ELETRÔNICA RÁDIO E TV

SUMÁRIO

11ª LIÇÃO TEÓRICA

REALIMENTAÇÃO NEGATIVA E AMPLIFICAÇÃO DE SINAIS DE ÁUDIO COM CIRCUITOS INTEGRADOS

REALIMENTAÇÃO NEGATIVA
- Tipos de realimentação
- Modos de aplicar a realimentação
- Ganho na realimentação
- Propriedades importantes da realimentação negativa
- O seguidor de emissor
- Critério de Nyquist

AMPLIFICAÇÃO DE SINAL DE ÁUDIO COM CIRCUITOS INTEGRADOS
- Amplificador diferencial
- Rejeição em modo comum
- Considerações sobre amplificadores operacionais (A.O.)
- Circuitos com amplificadores operacionais

11ª LIÇÃO PRÁTICA

REALIMENTAÇÃO NEGATIVA E AMPLIFICADOR DE SINAL DE ÁUDIO COM CIRCUITOS INTEGRADOS
- Onde aplicar a realimentação negativa
- Alguns exemplos de cálculo de realimentação
- Tipos de realimentação

AMPLIFICADOR DE SINAL DE ÁUDIO COM CIRCUITOS INTEGRADOS
- Amplificador Operacional - CI 741

11ª LIÇÃO ESPECIAL

CIRCUITO INTEGRADO

Microeletrônica
Circuitos integrados
Classificação do circuito integrado
Tecnologia do circuito integrado
Encapsulamento
Fixação de CI

INSTITUTO UNIVERSAL BRASILEIRO

CURSO DE ELETRÔNICA BÁSICA RÁDIO - TV

11ª LIÇÃO TEÓRICA

REALIMENTAÇÃO NEGATIVA E AMPLIFICAÇÃO DE SINAIS DE ÁUDIO COM CIRCUITOS INTEGRADOS

Diz-se que um circuito, seja ele composto de um ou diversos estágios, é **realimentado**, quando **uma parcela do sinal de saída é reinjetada na entrada**. O emprego da realimentação é freqüente em técnica eletrônica, e já tivemos oportunidade de apresentar um tipo de realimentação, ao tratar dos circuitos amplificadores.

I - Tipos de realimentação

Existem dois tipos de realimentação: um chamado de realimentação positiva e outro de realimentação negativa.

a) Realimentação positiva

Quando a parcela do sinal de saída, que é reaplicada à entrada do estágio, tem **mesma fase** que o sinal original, diz-se que a realimentação é **positiva** ou **degenerativa**. Neste caso, o estágio entra em oscilação, como já sabemos.

b) Realimentação negativa

Quando a parcela do sinal de saída, que é reinjetada à entrada, tem **fase oposta** àquela do sinal original, diz-se que a realimentação é **negativa, regenerativa** ou de **contra-reação**.

A realimentação negativa é largamente utilizada nos amplificadores de audiofreqüência, com a finalidade de melhorar seu desempenho.

São inúmeras as vantagens que a realimentação negativa proporciona ao amplificador. As principais são:

1ª) Redução da distorção harmônica.

2ª) Redução da distorção por intermodulação.

3ª) Redução da distorção de freqüência.

4ª) Redução da influência da variação de tensão da linha sobre a saída do amplificador.

5ª) Redução da distorção de fase.

6ª) Redução da influência devida ao "envelhecimento" do dispositivo amplificador, ou seja, devida à variação das características do transistor, com o tempo.

7ª) Melhora da relação sinal/ruído.

Como se nota, o emprego da realimentação negativa melhora consideravelmente o desempenho do amplificador e, por isso, é empregada em todos os amplificadores de boa qualidade.

Para que o aluno entenda como atua a realimentação negativa, vamos apresentar um exemplo elucidativo:

Admitamos que se aplique à entrada de um amplificador, um sinal perfeitamente **quadrado**, e que, na saída, se obtenha o sinal amplificado invertido, porém distorcido, como ilustramos na **figura 1**, onde representamos o amplificador por um bloco. Suponhamos, agora, que uma parte do sinal de saída retorne à entrada, como mostramos na **figura 2.** Esse sinal de retorno é amplificado e aparece na saída deformado, porém invertido em relação ao sinal de entrada. A situação fica sendo a seguinte:

De início, temos o sinal puro, e_e, que é amplificado e aparece invertido na saída, o qual chamamos de e_o. Uma parcela de e_o, que denominamos de e_f (para facilitar nossa figura, retiramo-lo do divisor de tensão formado por R_1 e R_2) é aplicada à entrada. O sinal e_f é amplificado e reaparece, na saída, invertido em relação ao sinal e_o. Em nossa figura, designamo-lo por e_{sf}. A soma do sinal e_o com e_{sf} dará o sinal de saída e_s. Como esses dois sinais são de fases opostas, eles se subtraem, havendo cancelamento relativo da deformação e diminuição do sinal de saída.
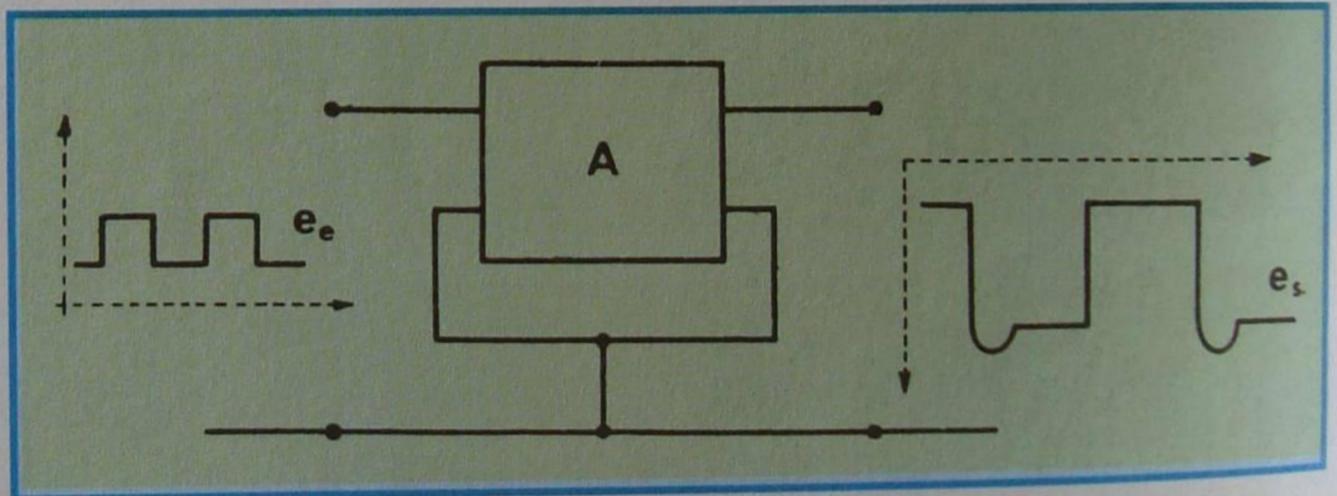
Figura 1 - Bloco de um amplificador sem realimentação negativa.
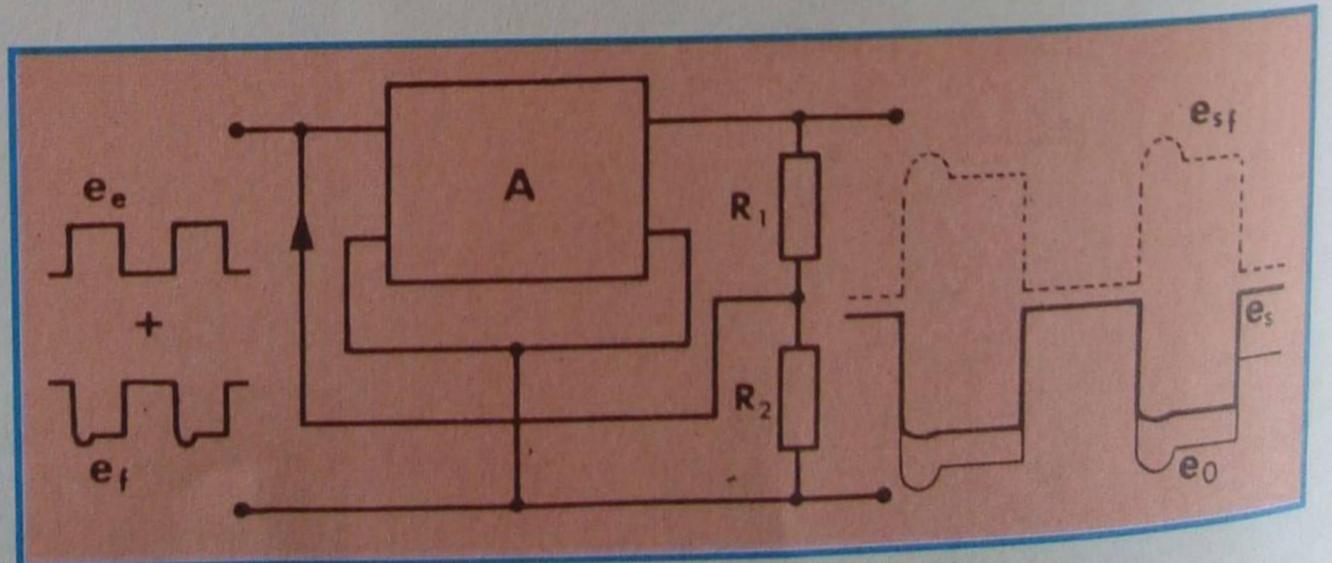
Figura 2 - Bloco de um amplificador com realimentação negativa.

Dessas explicações, o aluno pode concluir imediatamente que:

o ganho do amplificador realimentado negativamente é menor do que aquele que ele teria sem realimentação.

II - Modos de aplicar a realimentação

De acordo com a maneira de injetar o sinal de realimentação na entrada do amplificador, pode-se classificar a realimentação negativa em:

a) de tensão

Quando a parcela do sinal de entrada (sinal de realimentação) é proporcional à tensão do sinal de saída.

b) de corrente

Quando o sinal de realimentação é proporcional à corrente do sinal de saída.

c) mista

Quando o sinal de realimentação depende tanto da tensão como da corrente de saída, temos a realimentação mista.

Na **figura 3**, mostramos o diagrama de blocos da realimentação negativa de tensão e, na **figura 4**, um
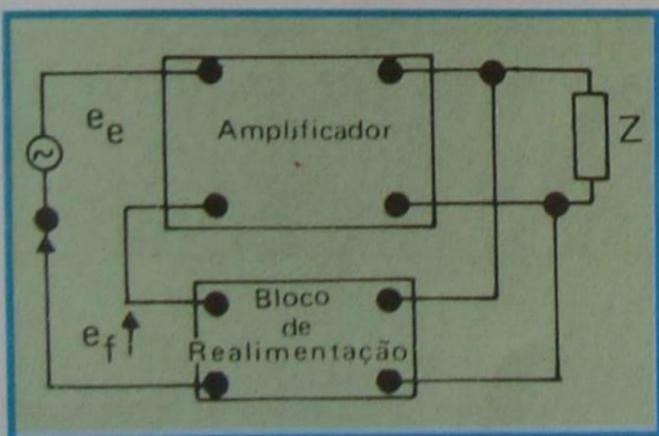
Figura 3 - Blocos da realimentação negativa de tensão.

exemplo prático. Como se observa, o sinal de saída do transistor T_2, que é um amplificador de potência, retorna à entrada através do divisor de tensão R_1 e R_2. O capacitor C_f bloqueia a corrente contínua, mas pode também ter influência na realimentação, se assim se desejar. Por exemplo, quando a capacidade de C_f é pequena, sua reatância é grande nas freqüências baixas, de modo que essas freqüências **não são realimentadas**, o que não acontece com as freqüências altas. Tal tipo de realimentação é chamado de **realimentação negativo-seletiva**, uma vez que são escolhidas as freqüências (ou banda de freqüências) que se deseja realimentar.

Na **figura 5**, mostramos o diagrama de blocos da realimentação de corrente. Como se nota, a tensão de realimentação é proporcional à corrente que passa pelo resistor R_f. Na **figura 6**, mostramos um circuito prático de realimentação de corrente. Trata-se do amplificador de potência em que se suprimiu o capacitor de emissor. A corrente de coletor que passa pelo resistor de emissor R_e provoca queda de
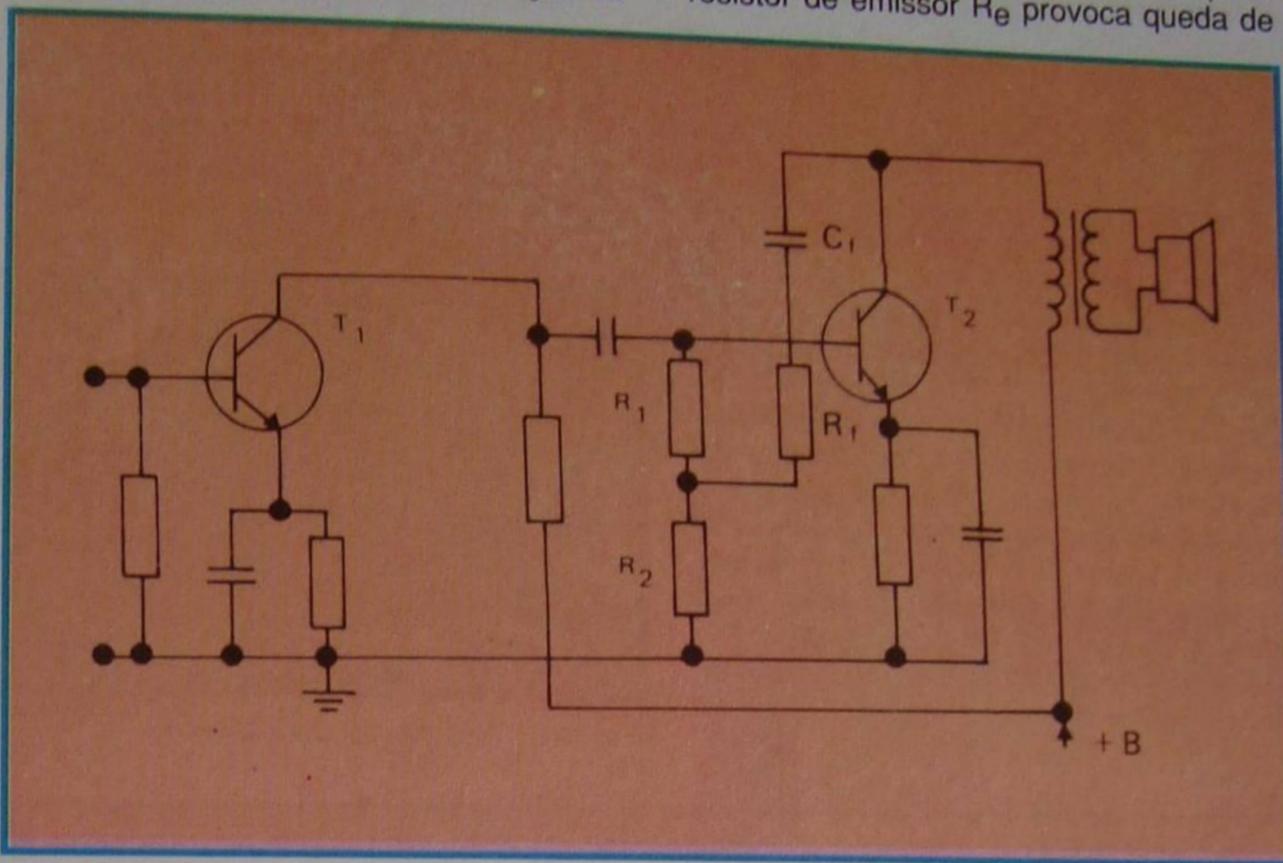
Figura 4 - Exemplo prático de um amplificador com realimentação negativa de tensão.
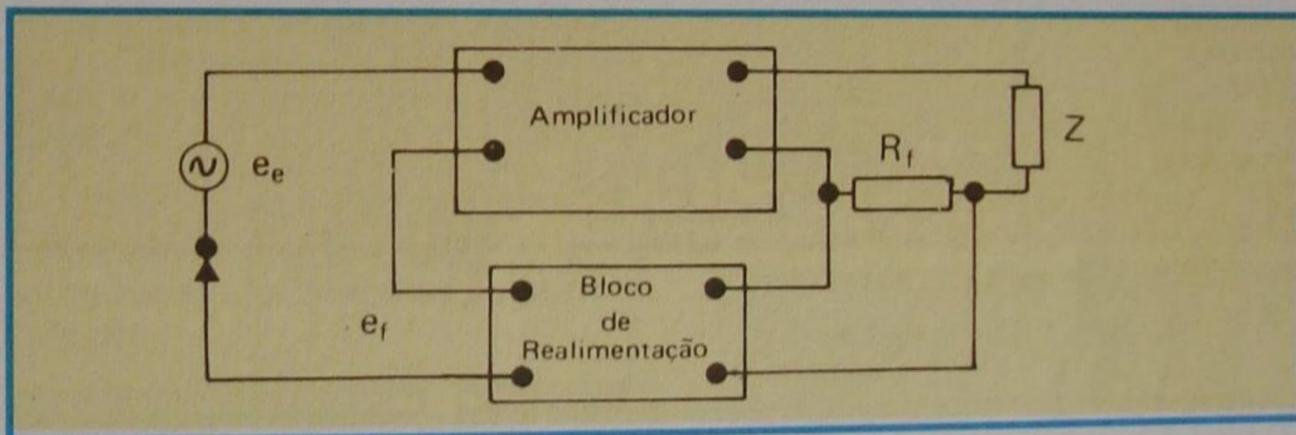
Figura 5 - Blocos da realimentação negativa de corrente.
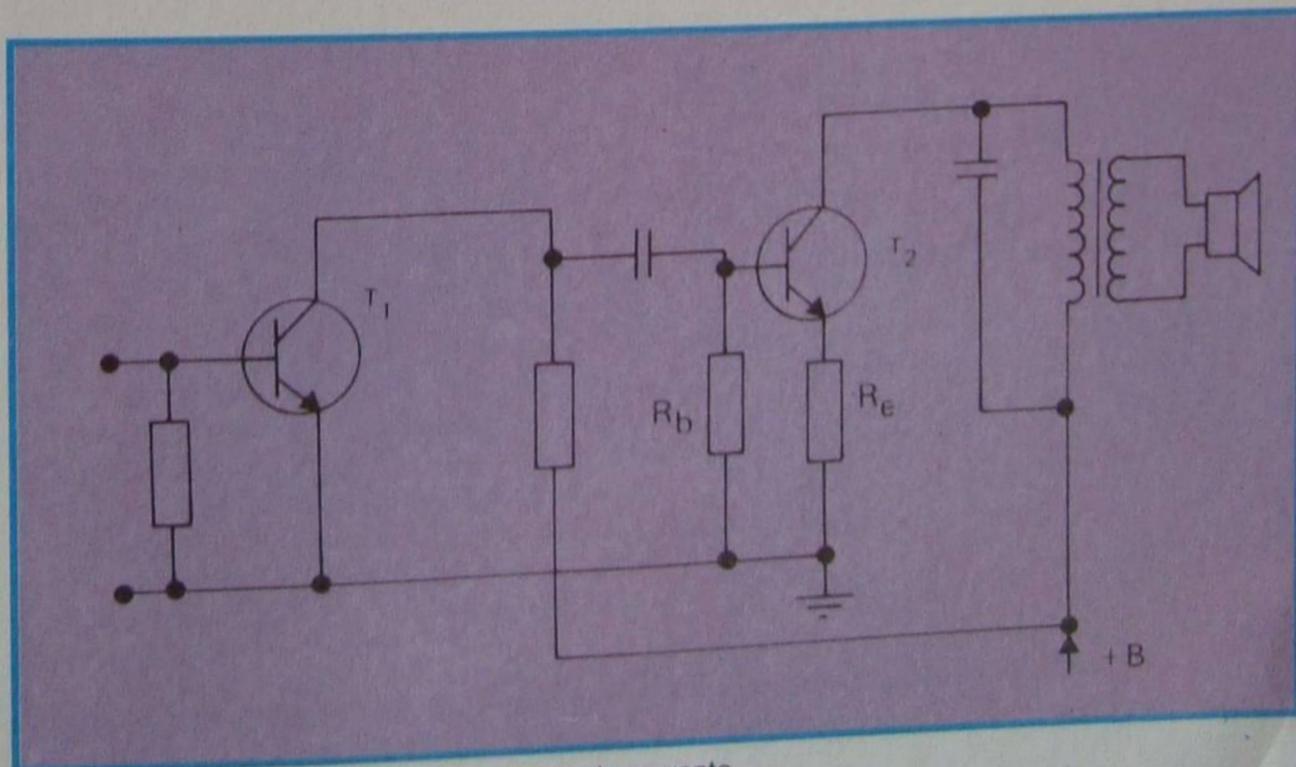
Figura 6 - Circuito prático de realimentação de corrente.

tensão, que é transmitida à base através do resistor R_b. A tensão em R_e depende do valor da corrente de coletor; portanto, trata-se de realimentação de corrente.

A **figura 7** mostra o diagrama de blocos da realimentação mista.

Na **figura 8**, apresentamos um amplificador de tensão com realimentação negativa mista.

O transistor T_1 está realimentado por corrente, devido ao fato de se ter suprimido o capacitor de emissor. Por outro lado, uma parte da tensão de saída do amplificador retorna ao transistor T_1 através do divisor de tensão R_f, R_e. Temos, aqui, realimentação de tensão. Conseqüentemente, estamos diante da realimentação negativa, mista.

Neste amplificador, o sinal de realimentação foi aplicado ao emissor do transistor T_1. Assim deve ser, porque o sinal e_s tem mesma fase que e_e, uma vez que o transistor T_1 provoca a inversão e o transistor T_2 a restauração da fase. Se o sinal fosse aplicado à base de T_1, teríamos realimentação positiva e, conseqüentemente, oscilação.

III - Ganho na realimentação

Como explicamos anteriormente, o preço que se paga pela realimentação é a diminuição do ganho, em relação ao amplificador sem realimentação. Contudo, são tantas as vantagens da realimentação negativa que compensa projetar amplificador com ganho elevado e reduzí-lo por realimentação.

Admitamos um amplificador sem realimentação, na entrada do qual se aplique a tensão e_e e na saída, resulte tensão e_s, como ilustramos na **figura 9**.

Para esse amplificador, sabemos que o ganho de tensão é dado pela relação entre a tensão de saída e a de entrada, ou seja:

$$G_V = \frac{e_s}{e_e}$$

Admitamos, agora, que uma parte do sinal de saída retorne à entrada.
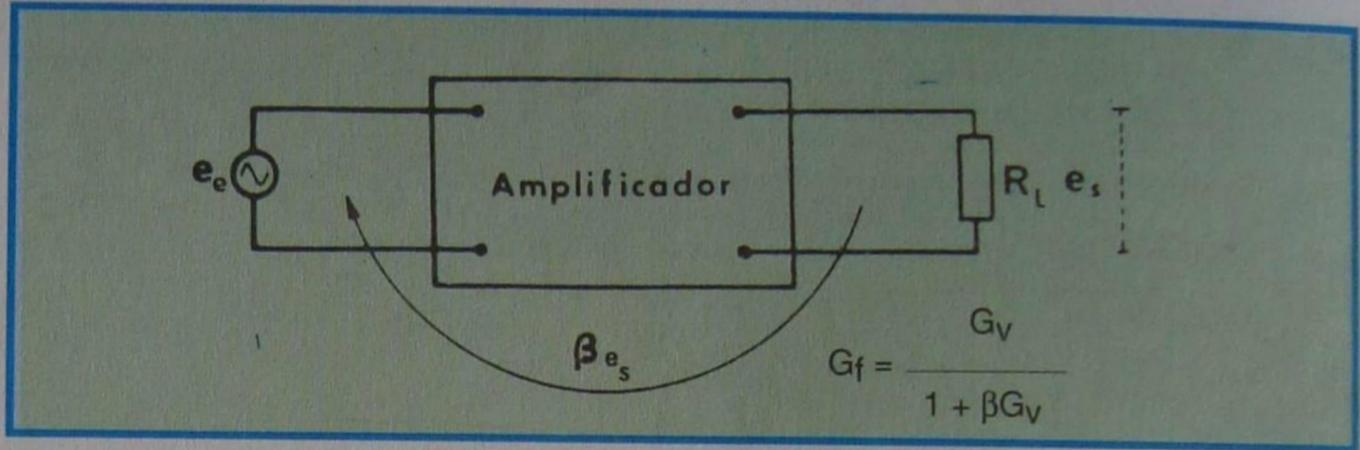
Figura 9 - Amplificador para análise.
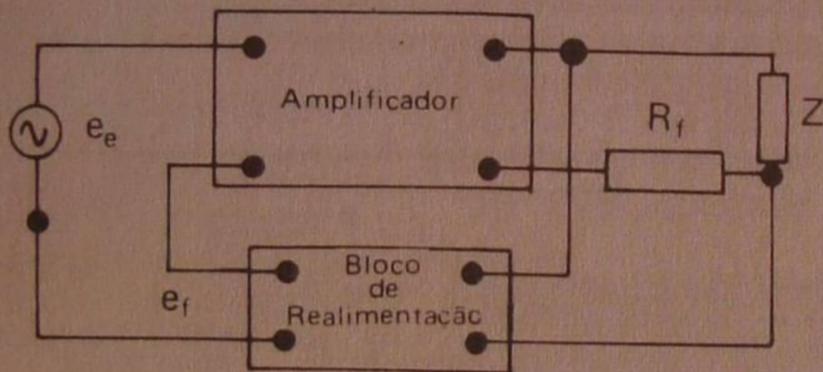
Figura 7 - Bloco de realimentação mista.

Vamos chamar de βe_s, essa parcela, onde β é um número que pode ser menor ou igual a 1. A β dá-se o nome de **coeficiente de realimentação** (apesar do símbolo ser o mesmo, não confundir este β com o "beta" dos transistores, que representa **ganho**).

A tensão na entrada do amplificador realimentado passa a ser:

$$e_e + \beta e_s$$

e o ganho realimentado será, portanto:

$$G_f = \frac{e_s}{e_e + \beta e_s}$$

Dividindo-se tanto o numerador como o denominador desta última expressão por e_s, teremos:

$$G_f = \frac{\frac{e_s}{e_e}}{\frac{e_e}{e_e} + \beta \cdot \frac{e_s}{e_e}}$$
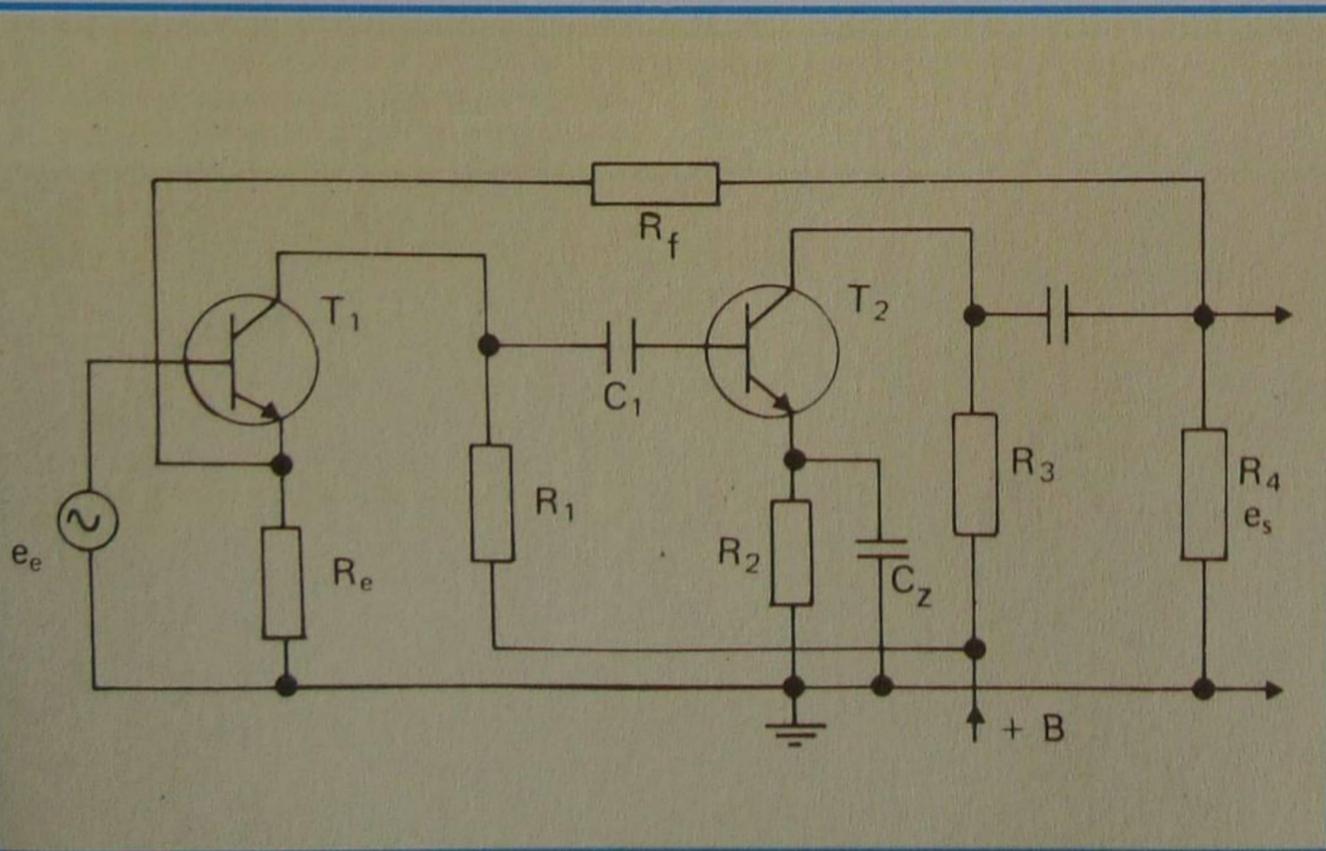
Figura 8 - Amplificador de tensão com realimentação negativa mista.

Porém, e_s/e_c é, como sabemos, o ganho de tensão sem realimentação, que chamamos de G_v, e $\frac{e_e}{e_e} = 1$, donde:

$$G_f = \frac{G_V}{1 + \beta G_V}$$

expressão esta que permite determinar o ganho do amplificador realimentado.

Na **figura 10**, mostramos um estágio amplificador transistorizado realimentado por corrente. Como o aluno percebe, bastou retirar o capacitor de desacoplamento de emissor, para produzir a realimentação negativa.
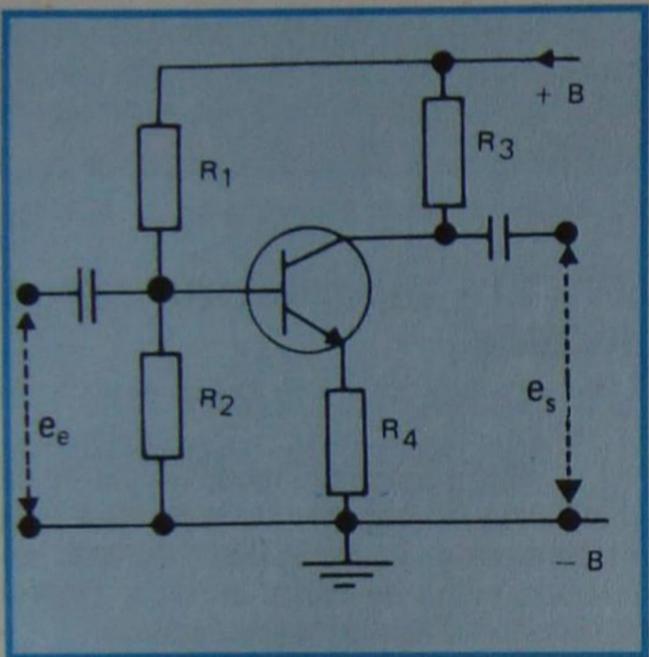
Figura 10 - Amplificador realimentado por corrente.

Na **figura 11**, apresentamos um estágio amplificador realimentado por tensão. Como não há capacitor de bloqueio de CC em série com R_b, existirá realimentação de CC e de CA.
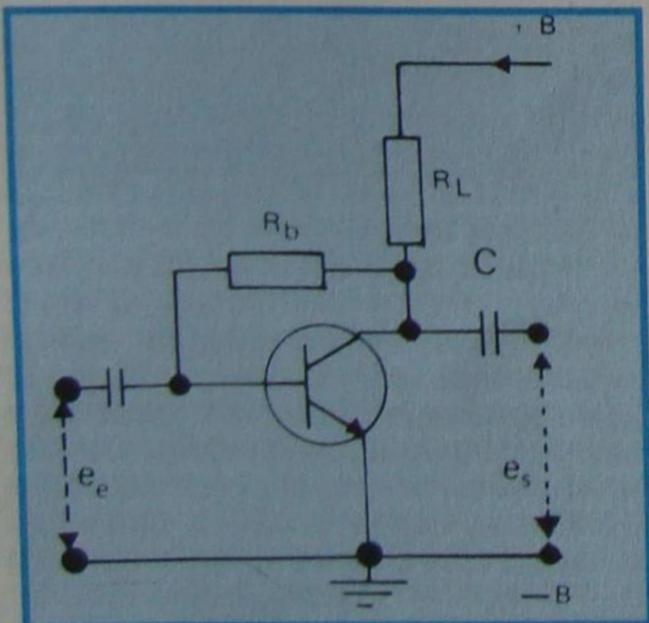
Figura 11 - Amplificador realimentado por tensão.

Finalmente, na **figura 12** mostramos um estágio com realimentação mista. Não é difícil de se concluir que esse estágio é a união dos dois mostrados nas figuras 10 e 11.
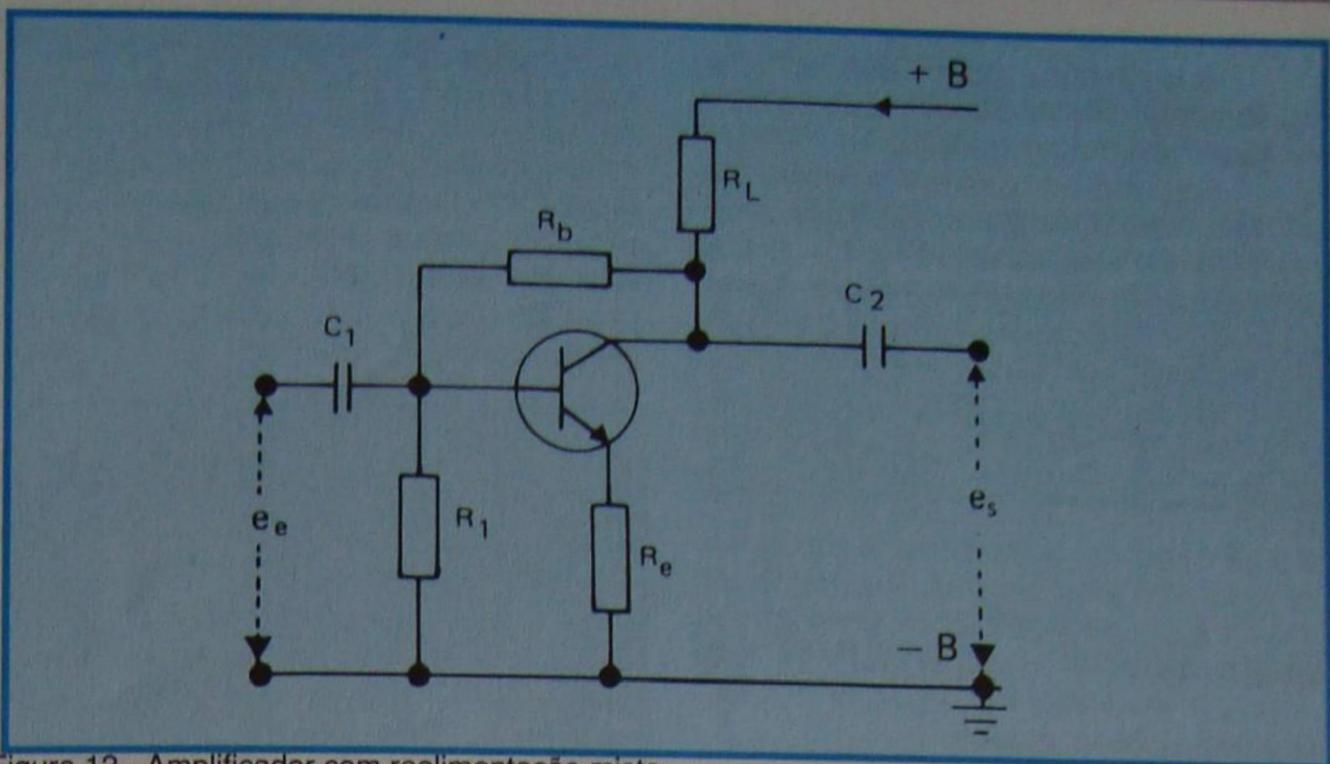
Figura 12 - Amplificador com realimentação mista.

IV - Propriedades importantes da realimentação negativa

A realimentação negativa é, como afirmamos, uma técnica extensamente utilizada para melhorar o desempenho dos amplificadores de áudio; conseqüentemente, é interessante saber o que dela se pode esperar, nas realizações práticas.

Para isso, daremos, abaixo, algumas das propriedades da realimentação:

1ª) Quando o produto βG_V é muito maior do que a unidade, o ganho realimentado é praticamente constante e dado por:

$$G_f = \frac{1}{\beta}$$

Esta propriedade garante o funcionamento uniforme de um amplificador, independentemente da variação da tensão de alimentação e das modificações dos parâmetros dos dispositivos amplificadores. Por exemplo, se o aluno substituir um transistor novo por outro bastante envelhecido, o amplificador acusará pouca diferença. Essa condição tem a desvantagem de reduzir em grande proporção a amplificação, ou seja, o ganho realimentado é muito pequeno em comparação com o ganho sem realimentação.

2ª) A variação relativa do ganho realimentado **é igual** à variação relativa do ganho sem realimentação **dividido** por $1 + \beta G_V$. Sob forma matemática, podemos escrever essa propriedade assim:

$$\frac{\Delta G_f}{G_f} = \frac{\Delta G_V}{G_V} \cdot \frac{1}{1 + \beta G_V}$$

A relação entre as variações relativas, com e sem realimentação, é chamada de **sensibilidade do ganho total**.

Em conseqüência dessa propriedade, segue-se que o amplificador realimentado é menos sensível aos agentes que provocam a variação de ganho.

> A sensibilidade às variações do ganho é tanto menor quanto maior é a realimentação.

Vamos dar um exemplo numérico do que se afirmou.

Admitamos que um amplificador sem realimentação tenha ganho igual a 100. Vamos supor que ele seja realimentado e que o fator de realimentação seja 0,09. Nestas condições, sabemos que o ganho realimentado será de:

$$G_f = \frac{G_V}{1 + \beta G_V} = \frac{100}{1 + 100 \times 0{,}09}$$

$$G_f = \frac{100}{1 + 9}$$

$$G_f = \frac{100}{10} = 10$$

Suponhamos, agora, que por uma causa qualquer ocorra uma queda de 30% no ganho sem realimentação.

Segundo o que se acabou de afirmar, a queda de ganho no amplificador realimentado será dada por:

$$\frac{\Delta G_f}{G_f} = \frac{\Delta G_v}{G_v} \cdot \frac{1}{1 + \beta G_v}$$

onde, substituindo $\frac{\Delta G_v}{G_v}$ por 0,3 (30%) e $(1 + \beta\, G_v)$ por 10, resulta:

$$\frac{\Delta G_f}{G_f} = 0{,}3 \cdot \frac{1}{10} = 0{,}03$$

ou seja, 3%.

Como se conclui deste exemplo, o ganho realimentado variou só 3%, enquanto o sem realimentação variou 30%.

O exemplo que acabamos de dar serve para demonstrar que a realimentação negativa aumenta a resposta de freqüência nos extremos da faixa de áudio, ou seja, alarga a banda passante.

Realmente, sabemos que as freqüências de corte são aquelas em que o ganho cai 30% (3 db), em relação ao ganho nas freqüências médias. Essa queda se deve ao efeito dos capacitores de derivação, de acoplamento e das capacitâncias de entrada e saída dos dispositivos amplificadores. Entretanto, vimos, no exemplo anterior, que o ganho realimentado diminui apenas 3%, quando o ganho sem realimentação diminui 30%. Isto significa que as freqüências de corte, tanto a inferior como a superior, foram bastante deslocadas, isto é, houve diminuição da inferior e aumento da superior. Isto equivale a dizer que ficou reduzida a distorção de freqüência (distorção de amplitude) do amplificador.

Assim como a distorção de freqüência, também a distorção de fase, distorção por intermodulação, distorção harmônica e os ruídos ficam reduzidos pela aplicação da **realimentação negativa.**

V - O seguidor de emissor

Uma aplicação muito comum da realimentação negativa de corrente em dose elevada está na conhecida montagem do transistor em seguidor de emissor (coletor à massa). Essa configuração é a que reproduzimos na **figura 13.** O aluno pode observar que, **para a corrente alternada**, o coletor do transistor está ligado à terra. A tensão de sinal é aplicada à base, e a tensão de saída, retirada no emissor.
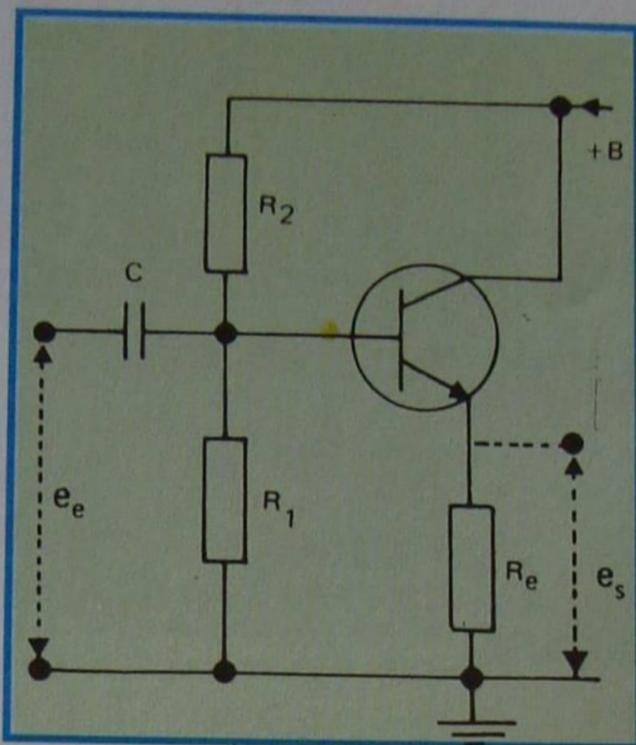
Figura 13 - Realimentação negativa de corrente.

O ganho do seguidor de emissor é sempre **menor** do que 1. Isto pode ser demonstrado observando que o fator de realimentação β é igual a 1, ou seja, toda a tensão de saída é reinjetada na entrada com fase invertida. Em conseqüência:

$$G_f = \frac{G_v}{1 + 1 \times G_v} = \frac{G_v}{1 + G_v}$$

que é menor do que 1, para qualquer valor do ganho G_v.

O transistor, nesta montagem, atenua (reduz) o sinal de entrada. O aluno certamente estará perguntando qual a vantagem de uma montagem que atenua o sinal, ao invés de amplificá-lo. Podemos adiantar que há vantagens em muitas aplicações e, por isso mesmo, o seguidor de emissor é muito utilizado na prática.

As principais são:

1ª) O ganho é independente da amplificação sem realimentação - como demonstramos linhas atrás - o que significa que a resposta de freqüência é bastante linear.

2ª) A impedância de entrada é maior do que seria sem realimentação.

3ª) A impedância de saída é baixa em relação à montagem sem realimentação.

Estas duas últimas propriedades (2ª e 3ª) mostram que o seguidor de emissor pode ser utilizado vantajosamente como casador de impedância.

Nos amplificadores transistorizados, o seguidor de emissor é um dos artifícios que se empregam para aumentar a impedância de entrada que, como sabe o aluno, é baixa nos transistores.

4ª) A tensão de saída está em fase com a de entrada.

5ª) A montagem funciona muito bem, tanto em baixas como em altas freqüências, isto é, tanto em áudio como em RF.

VI - Inversor de carga dividida

Outra aplicação muito freqüente da realimentação negativa de corrente é feita no conhecido circuito inversor de fase, conhecido como de carga dividida. Reproduzimo-lo na **figura 14** para análise.

Neste circuito, como R_1 deve ser obrigatoriamente igual a R_2, para que e_{s_1} seja igual a e_{s_2}, resulta que o coeficiente (ou fator) de realimentação é igual a:

$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{R_1}{R_1 + R_1} = \frac{R_1}{2R_1} = \frac{1}{2} = 0{,}5$$

Nestas condições, o ganho máximo será **igual** ou **menor** do que 2, como o aluno poderá verificar aplicando a fórmula do **ganho realimentado**. Como a tensão de saída se divide entre o coletor e o emissor, segue-se que o ganho na saída e_{s_1} (que é o mesmo que o na saída e_{s_2}) é menor do que 1, ou no máximo igual a 1.

Embora esse defasador não proporcione ganho, ele goza da preferência dos projetistas de amplificadores, pela sua extrema simplicidade e porque ele tem todas as qualidades do seguidor de emissor pois, na realidade, se trata de tal montagem.
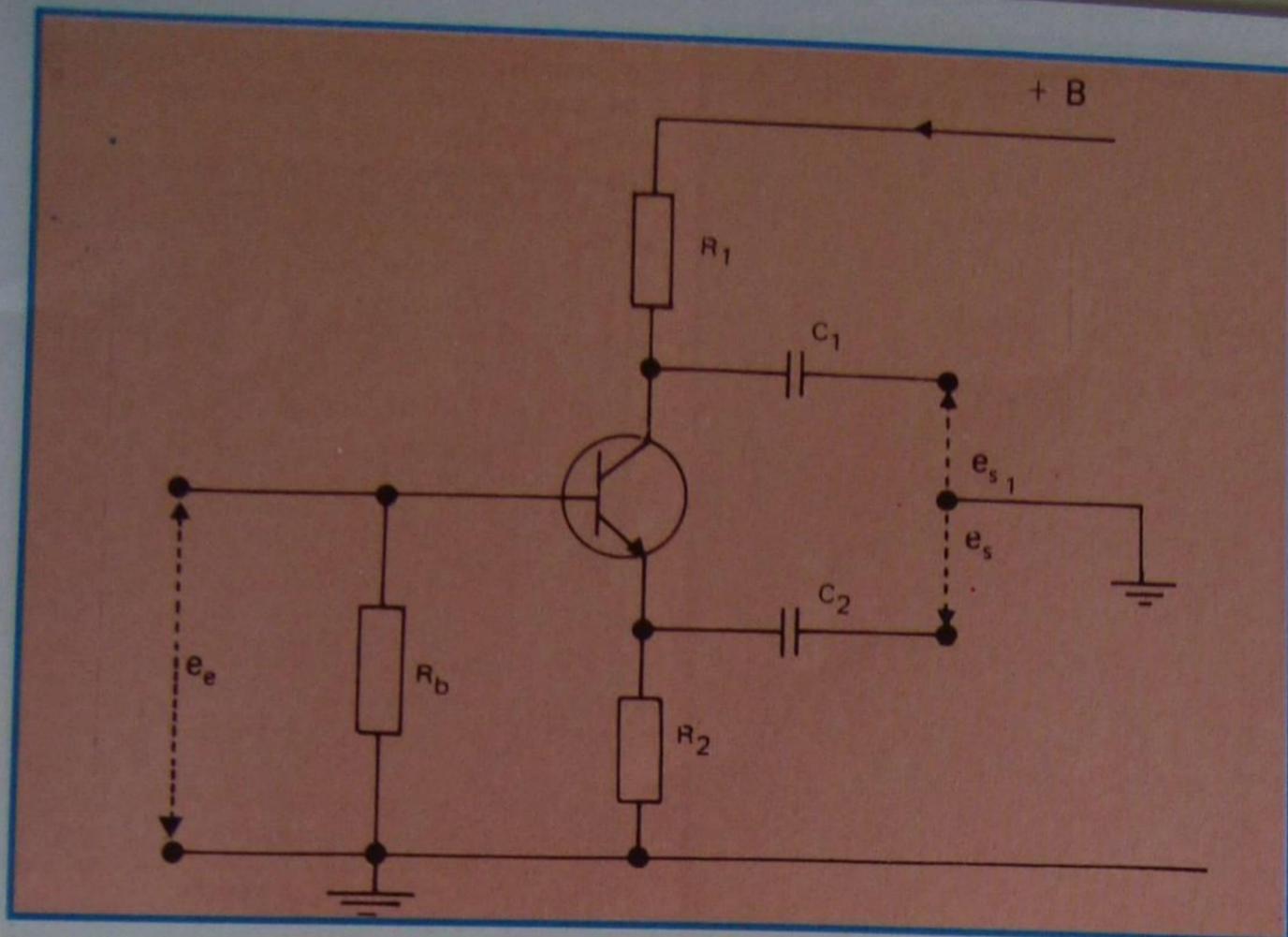
Figura 14 - Inversor de fase de carga dividida.

VII - Estabilidade do amplificador realimentado

A realimentação negativa é, como o aluno pode concluir de nossa explanação, um poderoso método de melhorar as qualidades de um amplificador; entretanto, ela deve ser utilizada com bastante cuidado, para evitar que seus efeitos sejam contrários aos esperados.

De fato, o aluno sabe que os acoplamentos entre estágios amplificadores, sejam eles do tipo RC ou por transformador, produzem deslocamentos de fase que variam de acordo com a freqüência. Ora, esses deslocamentos se somam e poderá acontecer que o sinal de saída esteja em fase com o de entrada; neste caso, o amplificador oscilará. Esta situação é bastante comum ao se inverterem as ligações do secundário do transformador de saída, quando a tensão de realimentação é daí retirada. Porém, isto não constitui problema (se o amplificador estiver corretamente projetado), pois basta trocar as ligações do secundário do transformador e o mal será sanado.

Devido à rotação de fase citada, muitas vezes o amplificador entra em oscilação somente quando é excitado por sinal de determinadas freqüências, podendo ser do início da faixa de áudio, do fim da faixa de áudio ou, simultaneamente, do início e do fim da faixa. Obviamente, essa oscilação transitória produz distorção, piorando a qualidade do amplificador.

Para se ter certeza de que não haverá oscilação, é necessário fazer um estudo prévio da estabilidade do amplificador. Para isso, existem vários métodos e critérios, mas todos eles fogem ao escopo de nosso curso. Entretanto, à guisa de informação, vamos descrever o critério de Nyquist, para que o aluno tenha, pelo menos, uma informação de como ele se processa.

Critério de Nyquist

Este critério, evidentemente, tem seus fundamentos teóricos que permitem fazer a previsão da estabilidade do amplificador. Todavia, mostraremos somente como se faz a verificação da estabilidade.

Inicialmente, é projetado o amplificador com o fator de realimentação que o projetista julgar adequado às suas necessidades. Em seguida, monta-se o amplificador sem ligar o elo de realimentação, porém, mantendo-o. Agora, aplica-se um sinal de tensão constante na entrada do amplificador e cuja freqüência se possa variar. Medem-se, para as diversas freqüências, as tensões e_s, e βe_s, que seria realimentada, e a relação de fase. As tensões de saída e_s, e βe_s, além da relação de fase, podem ser medidas com o auxílio de um osciloscópio (instrumento que veremos em um momento oportuno). Dividindo-se a tensão de saída pela de entrada, tem-se o ganho do amplificador com "malha aberta", ou seja, sem realimentação.

Para cada uma das freqüências ensaiadas, calcula-se o produto βG_V, uma vez que $G_V = e_s/e_e$.

Agora, traça-se um segmento de reta e, a partir de uma extremidade O, marca-se sobre ele um comprimento qualquer, que será a unidade. A seguir, tendo o ponto O como origem, o segmento de reta como referência e o comprimento O1 como unidade, marcam-se os pontos correspondentes às freqüências ensaiadas. Como exemplo, marcamos alguns pontos em nossa **figura 15**. O ponto **P**, traçado para exemplificar, corresponde à freqüência de 8 000 Hz em um amplificador hipotético, cujo produto $\beta G_V = 2$ e o ângulo de fase é de 45°.

Uma vez traçado todos os pontos, unimo-los e teremos o diagrama de Nyquist.

O critério de estabilidade afirma que, se a curva formada não contiver o ponto 1, o amplificador será estável.

Além disso, traçando-se uma circunferência de raio unitário e centro em 1, as freqüências cujos pontos caiam dentro desse círculo são freqüências para as quais a realimentação é positiva.

Analisando a figura 15, podemos afirmar que o amplificador é estável, porque a curva não contém o ponto 1, ou seja, o ponto 1 não está dentro dela.

Podemos afirmar, também, que para as freqüências maiores que 8 500 Hz e menores que 200 Hz há realimentação positiva.

O aluno deve entender que a realimentação positiva produzirá reforço de amplificação nessas freqüências e não oscilação, porque a rotação de fase não corresponde a 180°, nessas freqüências.

Quando o diagrama de Nyquist contiver o ponto 1, a solução será modificar a quantidade de realimentação, diminuindo-a ou melhorando a qualidade dos componentes, principalmente do transformador de saída, se for o caso.

Dessa afirmação, o aluno pode deduzir que a realimentação negativa não pode ser aplicada a vontade. Se o projeto não for bem cuidado, não se deverá exceder a $(1 + \beta G) = 5$, o que em linguagem logarítmica corresponde a 14 db (14 decibéis).

Como observação final deste tópico, queremos chamar atenção do aluno para o fato de que um amplificador mal projetado muitas vezes pode ser melhorado pela aplicação da realimentação negativa. Isto, naturalmente, vai provocar redução do ganho; entretanto, este pode ser restabelecido pelo emprego de mais um transistor, ou pela substituição do transistor por outro de maior coeficiente de amplificação.

Entretanto, isto só poderá ser feito se o técnico possuir conhecimentos necessários.
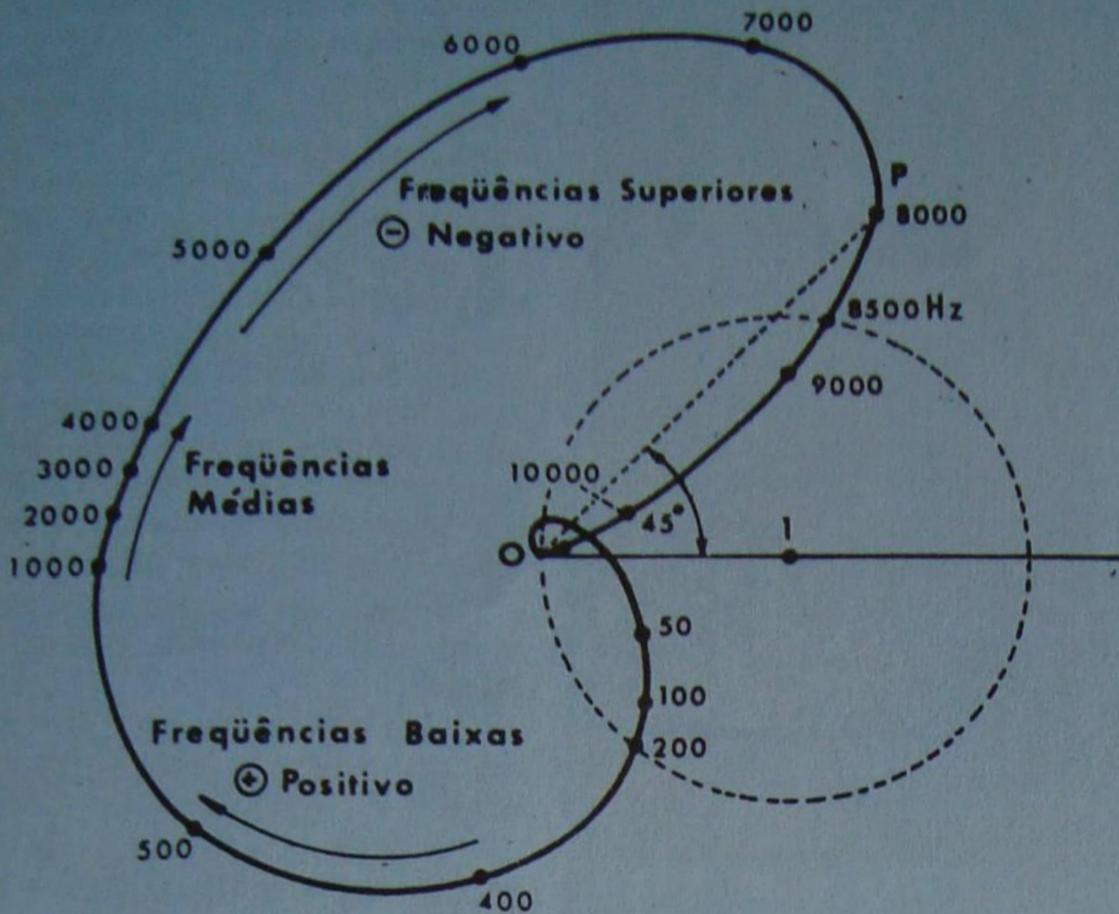
Figura 15 - Diagrama de Nyquist.

AMPLIFICAÇÃO DE SINAL DE ÁUDIO COM CIRCUITOS INTEGRADOS

O circuito integrado (CI), tem-se tornado, devido ao uso em diversas áreas, um elemento cuja função e finalidade básica serão conhecidas no decorrer de nosso curso.

A característica mais notável de um CI é o seu diminuto tamanho. Os circuitos integrados são irreparáveis, isto é, se um único componente dentro de um CI falhar, o circuito integrado completo é substituído, sendo esta a solução mais prática.

Existem atualmente três tipos de CIs disponíveis no mercado em larga escala; são eles: o monolítico, filme fino ou grosso e os circuitos integrados híbridos.

Os circuitos integrados lineares são utilizados nos amplificadores operacionais, os quais passamos a descrever.

I - Amplificador diferencial

Os amplificadores diferenciais, muito empregados nos amplificadores operacionais integrados, são dispositivos que, conforme o próprio nome sugere, amplificam as diferenças existentes entre as tensões presentes nos seus terminais de entrada.

O amplificador diferencial é um tipo especial de circuito usado em muitas aplicações, tais como: amplificação de áudio, amplificação de radiofreqüência (RF), amplificação de vídeo, amplificação de pequenos e grandes sinais com acoplamentos RC ou por transformadores.

A **figura 16** mostra o símbolo de bloco de um amplificador diferencial básico, com dois terminais de entrada (1 e 2), dois terminais de saída (3 e 4) e uma ligação à terra separada dos terminais de entrada e saída.
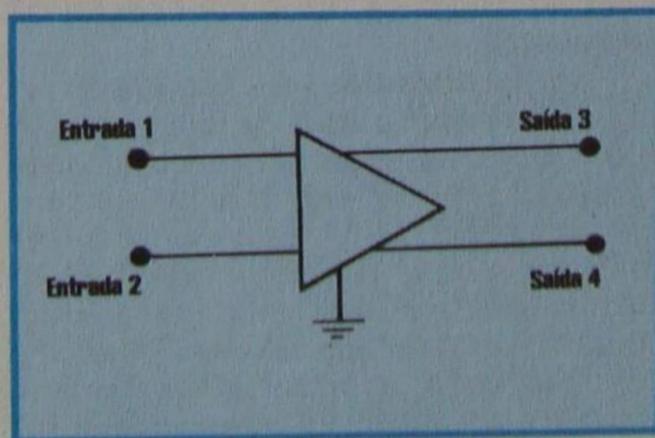
Figura 16 - Símbolo de um operacional de duas entradas e duas saídas.

Vemos, na **figura 17**, a representação gráfica de um amplificador diferencial, em sua configuração básica.

Nesta ilustração vemos os transistores T_1 e T_2, os quais formam o par diferencial. Vemos também, nesta mesma ilustração, que ambos os transistores possuem suas correntes de emissor impostas pelo resistor R_E.
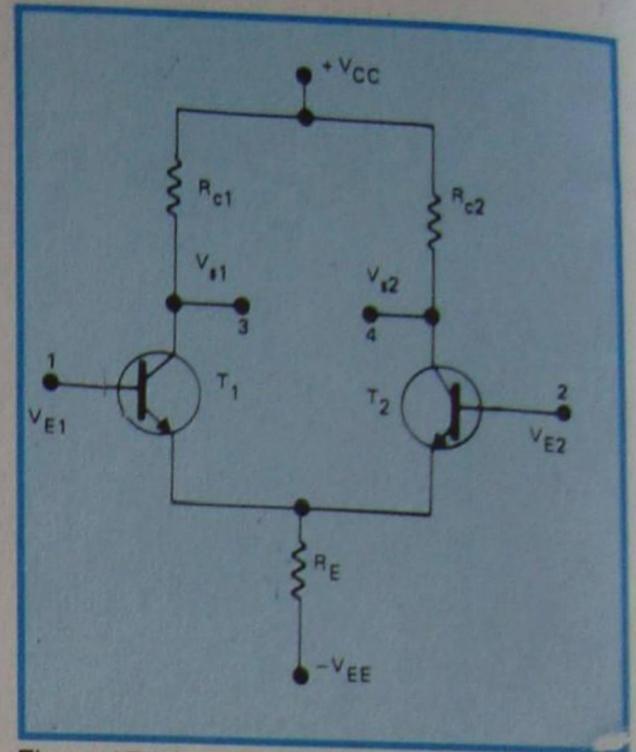
Figura 17 - Amplificador diferencial.

Supondo-se que ambos os transistores apresentem características idênticas, os circuitos formados por tais transistores irão se comportar como divisores de tensão, pois seus emissores encontram-se conectados a um único ponto.

Por esta mesma ilustração, concluímos também que a soma das correntes de emissor destes transistores será igual a I_0, pois a mesma se "divide" entre os transistores.

Com isto, caso houver um aumento no valor da corrente de coletor em qualquer um dos transistores, esta corrente será "roubada" do emissor do outro transistor, já que $I_{E1} + I_{E2} = I_0$ e, portanto, a corrente de um dos emissores será igual à corrente total menos a corrente do outro emissor.

Deste modo, caso a base de T_1 tornar-se mais positiva, este transistor irá conduzir mais e, conseqüentemente, I_{CE1} irá aumentar, simultaneamente à diminuição do valor da sua tensão de coletor, representada por V_{S1}.

Paralelamente a isto, a corrente I_{CE2} irá diminuir de valor, pois $I_0 - I_{CE1} = I_{CE2}$ e, como já mencionamos, I_0 é constante e fixa.

Com esta diminuição de corrente em T_2, o mesmo será levado mais próximo ao corte e, com isto, sua tensão de coletor V_{S2} aumentará.

O processo é semelhante, tanto em relação ao sinal de base de T_1 quanto em relação ao sinal de base de T_2, ou seja, há uma recíproca entre os transistores e obteríamos teoricamente, nos coletores dos mesmos, o produto do ganho pela diferença entre os sinais de base dos transistores.

Caso mantermos uma das bases em um valor constante e injetarmos um

sinal na outra base, obteremos nos coletores dos transistores o mesmo sinal, porém com fases opostas; para melhor compreensão, vamos supor que a base do T_2 permaneça em um potencial constante.

Resumidamente, caso a tensão V_{E1}, alterar-se e ficar mais positiva, teríamos:

- A base de T_1 também fica mais positivada.
- Se a base de T_1 ficar mais positiva, o transistor T_1 conduzirá mais.
- T_1 conduzindo mais, V_{S1} diminui e I_{E1} aumenta.
- Com isto, I_{E2} diminui e T_2 conduz menos.
- Se T_2 conduz menos, V_{S2} aumenta. Por outro lado, caso a tensão V_{E1} tornar-se mais negativo, teríamos:
- A base de T_1, desta vez, ficará negativa.
- Se a base de T_1 ficar mais negativa, este transistor conduzirá menos.
- T_1 conduzindo menos, V_{S1} aumenta e I_{E1} diminui.
- Com isto, I_{E2} aumenta e T_2 conduz mais.
- Se T_2 conduz mais, VS_2 diminui.

Ora, em relação à tensão V_{E1}, o sinal obtido no coletor de T_1 está invertido, porém o sinal presente no coletor de T_2 está em fase. Temos, portanto, dois sinais idênticos, porém defasados em 180°.

Julgamos conveniente lembrarmos que o comportamento do circuito foi exposto, partindo-se do princípio de que ambos os transistores são idênticos e possuidores de mesmas características.

Caso isto não for verídico, faz-se necessário realizar algumas alterações na configuração básica apresentada.

Cabe aqui esclarecer ao aluno que o comportamento do circuito, considerando-se alterações de valores em V_{E2} e mantendo-se V_{E1} constante, é equivalente ao que foi visto com flutuações de V_{E1} e com V_{E2} constante.

Podemos do exposto tirar duas conclusões importantes:

1ª) Em relação à saída 3, a entrada 1 é **inversora** (pois inverte o sinal), enquanto que a entrada 2 é **não- inversora,** pois o sinal aplicado nesta não surge invertido na saída 3.

2ª) Em relação à saída 4, a situação se inverte: a entrada 1 é considerada como não-inversora, enquanto que a entrada 2 passa a ser a inversora.

Outro ponto que julgamos conveniente tecermos alguns comentários refere-se à alimentação do circuito. A maioria dos amplificadores diferenciais trabalham com fontes chamadas FONTES SIMÉTRICAS, pois se utilizam de um mesmo valor absoluto de tensão, sendo um deles positivo e o outro negativo em relação a um ponto de referência ou terra, conforme mostrado na **figura 18.**

As fontes de alimentação, na grande maioria, não apresentam saídas simétricas por problemas de custo; portanto, para se alimentar um amplificador operacional deveríamos utilizar duas fontes,
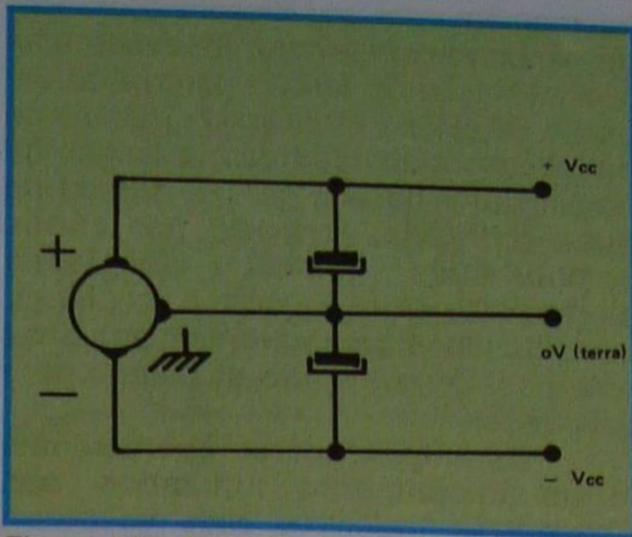
Figura 18 - Amostra de obtenção de tensão simétrica.

convenientemente interligadas, para obtermos + Vcc e - Vcc. Como duas fontes de alimentação implica em um custo elevado de equipamento, podemos implementar uma fonte simétrica utilizando o circuito mostrado na **figura 19.**
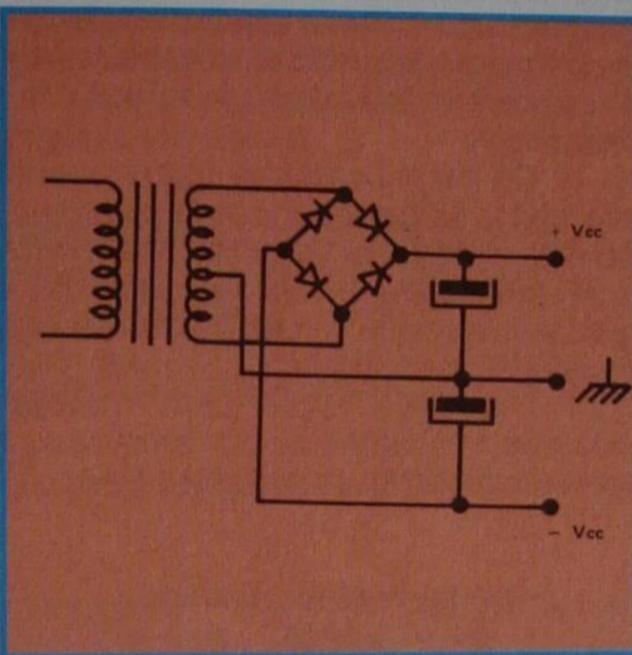
Figura 19 - Fonte simétrica.

Normalmente utilizamos + 12V e -12V ou + 6V e -6V para alimentar-se circuitos que fazem uso de amplificadores operacionais. Para obter, a partir de uma fonte de alimentação simples, tensões simétricas, pode-se utilizar o circuito da **figura 20**.

Feito isto, a referência (TERRA) não será mais o terminal negativo da fonte de alimentação e sim o ponto indicado por **T** que será considerado um terra, ao qual serão referenciados quaisquer valores e medidas obtidos no circuito em funcionamento.
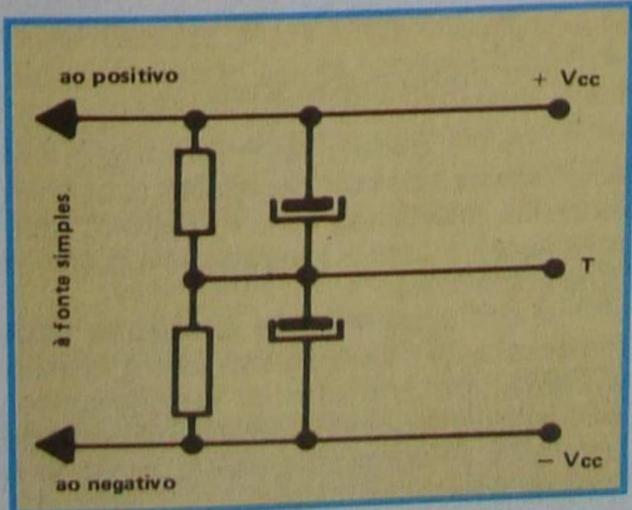
Figura 20 - Criação de um terra artificial.

II - Rejeição em modo comum

Uma das principais características de um amplificador diferencial é o de rejeitar certos tipos de sinais indesejáveis, denominados **ruídos.** O que vale ressaltar é que não desejamos amplificar estes sinais de ruído com o amplificador diferencial. O importante deste amplificador é que o sinal de ruído aparece nas **duas** entradas do circuito. Portanto, o sinal de ruído que aparece com a mesma polaridade nos dois terminais de entrada, será rejeitado na saída do amplificador diferencial.

A rejeição em modo comum do amplificador é uma **medida** desta rejeição **de sinais comuns** às **duas entradas**, e o valor atribuído é denominado **taxa de rejeição em modo comum** (common-mode rejection ratio - **CMRR**)

A **figura 21** mostra um amplificador com **dois** sinais de entrada possuidores de componentes com polaridades **opostas** e componentes de polaridades **iguais**. O ideal seria que o amplificador diferencial tivesse um **elevado** ganho para as componentes de polaridades **opostas**, e ganho **zero** para as componentes de **igual** polaridade.
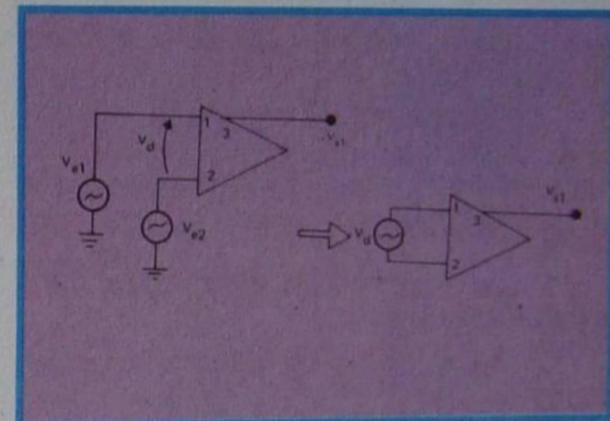
Figura 21 - Exemplo de rejeição em modo comum.

A tensão medida V_d do terminal 1 para o terminal 2 na figura 21 é:

$$V_d = V_{e1} - V_{e2}$$

Em relação às componentes **comuns** para os sinais de entrada, que chamaremos de "V_c", definimos uma entrada comum como:

$$V_c = \frac{1}{2} \cdot (V_{e1} + V_{e2})$$

A **figura 22** mostra um amplificador diferencial operando em modo comum **ideal** ($V_{e1} = V_{e2}$):

$$V_c = \frac{1}{2} \cdot (V_{e1} + V_{e2}) = V_{e1} = V_{e2}$$
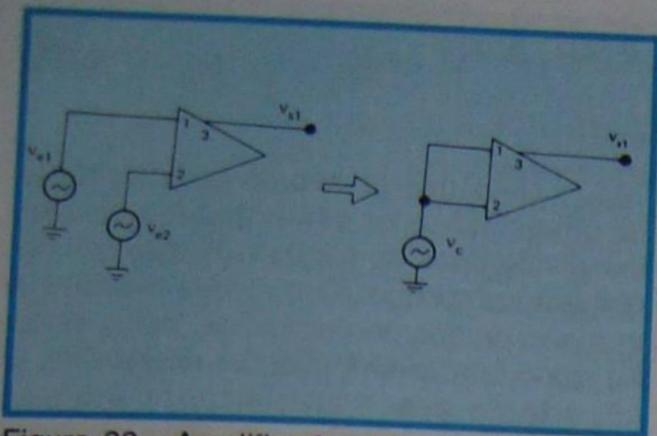
Figura 22 - Amplificador diferencial ideal em modo comum.

A partir das equações de V_d e V_c, podemos obter expressões para V_{e1} e V_{e2}:

$$V_d = V_{e1} - V_{e2} \Rightarrow V_{e1} = V_c + \frac{V_d}{2}$$

$$V_c = \frac{1}{2}(V_{e1} + V_{e2}) \Rightarrow V_{e2} = V_c - \frac{V_d}{2}$$

As expressões para a tensão de saída do amplificador são as seguintes:

$$V_{s1} = G_d V_d + G_c V_c$$
$$V_{s2} = - G_d V_d + G_c V_c$$

onde:

G_d = ganho do amplificador em modo diferencial

G_c = ganho do amplificador em modo comum

A taxa de rejeição em modo comum, é definida por:

$$CMRR = \frac{G_d}{G_c} \text{ ou } CMRR = 20 \log \frac{G_d}{G_c}$$

É óbvio que a operação desejada será com G_d elevado e G_c muito pequeno, isto é, os sinais com polaridades opostas resultarão muito amplificados no terminal de saída, enquanto que os sinais de mesma polaridade serão bem pouco amplificados (quase cancelados).

III - Considerações sobre Amplificadores Operacionais (A.O.)

O amplificador operacional possui internamente um amplificador diferencial de ganho muito elevado, utilizando uma realimentação de tensão para gerar um ganho de tensão estabilizado.Trata-se de um circuito elaborado com a função de amplificador de alto ganho, dotado de duas entradas, formado por vários componentes ativos acoplados diretamente entre si, com o auxílio de pouquíssimos componentes passivos externos, os quais são utilizados para polarização.

Os amplificadores operacionais foram inicialmente utilizados nos Simuladores Analógicos, onde realizavam operações de soma, subtração, multiplicação, integração e outras operações matemáticas, daí terem sido chamados OPERACIONAIS. Muito embora seja conservado o nome de operacionais, são utilizados em muitas outras aplicações lineares que não as de operação matemática propriamente dita.

Atualmente encontram-se amplificadores operacionais econômicos e com excelentes características, construídos em circuitos integrados híbridos ou monolíticos.

Os amplificadores operacionais são constituídos de modo a permanecerem estáveis, quando há forte realimentação por meio de uma rede passiva associada, visando controlar sua característica de resposta.

Podemos citar como características marcantes de um amplificador operacional IDEAL os seguintes itens:

a) Impedância de Entrada
   Zi = ∞ (infinito)
b) Impedância de Saída
   Zo = 0 (nula)
c) Ganho em tensão
   $G_V = \infty$ (infinito)
d) Largura de Faixa
   LF = ∞ (infinito)
e) Não Influência de Temperatura
f) Tempo de subida e descida nulos
g) Balanceamento Perfeito, ou seja, para $V_n = V_p$ temos $V_o = 0$.
   Observe que:

V_n = tensão na entrada INVERSORA

V_p = tensão na entrada NÃO-INVERSORA

V_o = tensão na saída do operacional

T = terra (referência)

A **figura 23** mostra um amplificador operacional básico com duas entradas, marcadas com + (entrada não-inversora) e com - (entrada inversora) e uma única saída.

Um sinal injetado à entrada não-inversora (+) surgirá na saída com a mesma polaridade e amplificado, enquanto que um sinal aplicado à entrada inversora (-) surgirá na saída, invertido e amplificado.
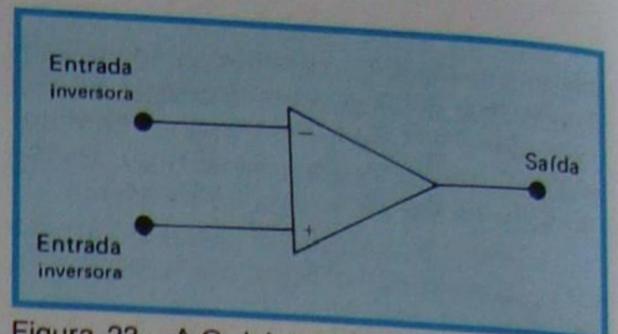
Figura 23 - A.O. básico com duas entradas e uma saída.

IV - Circuitos com Amplificadores Operacionais

Configurações Básicas

Dentre as configurações básicas, a mais elementar é a mostrada na **figura 24,** conhecida como comparador de voltagem.
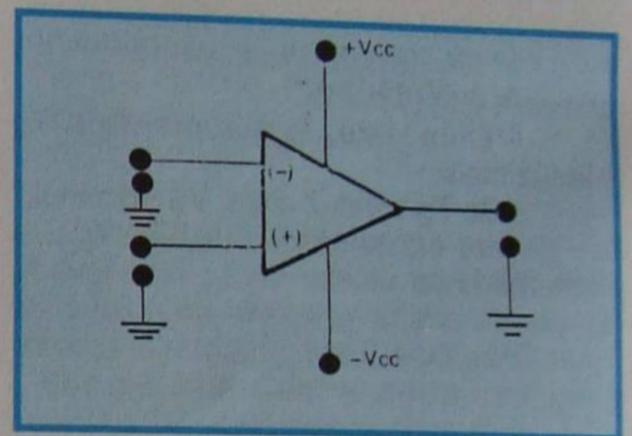
Figura 24 - Comparador de tensão.

Nesta configuração, conforme foi dito anteriormente, obteremos na saída do operacional a diferença entre os sinais presentes na entrada multiplicada pelo ganho, que neste caso fica em torno de, no mínimo 100.000 vezes.

Como exemplo, vamos supor que seja injetada em uma das entradas (para facilitar o raciocínio vamos escolher a entrada inversora) 20μV positivos, enquanto que na outra entrada esteja presente apenas 10μV, também positivos.

Sendo a diferença de 10 μV (20μV - 10μV), e o ganho algo em torno de 100.000, obteremos na saída aproximadamente 1 V, o suficiente para excitar qualquer dispositivo que nos indique que há uma diferença entre as voltagens comparadas. Como o sinal de entrada maior se encontra em nosso exemplo, presente na entrada inversora, a tensão de saída terá polaridade contrária a esta, ou seja, - 1 V (um Volt negativo).

Conclui-se que, caso façamos constante o valor da tensão de entrada não inversora, com valor igual a zero, para que a diferença entre os sinais desta entrada e entrada inversora seja máxima, qualquer sinal aplicado na entrada inversora sofrerá um ganho de 100.000, além de inversão de fase. Tal configuração é chamada de **amplificador inversor aberto**, o qual pode ser visto na **figura 25**. Porém este tipo de circuito não apresenta muita precisão ou estabilidade

de funcionamento, visto que qualquer indução de tensão da ordem de 1μV na entrada (causada, por exemplo, pelas variações de fonte) resultariam em um "ruído" de aproximadamente 0,1 V na saída.
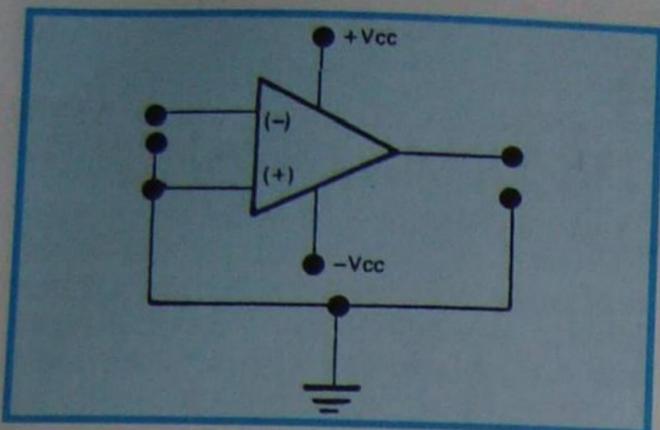
Figura 25 - Amplificador inversor aberto.

Optando-se pela redução do ganho e melhor estabilidade, acrescentou-se ao circuito três resistores, fazendo-se assim o circuito que chamamos de **amplificador inversor fechado**, o qual pode ser visto na **figura 26**. Nesta configuração pode-se controlar o ganho do operacional, controlando-se a quantidade de sinal, obtido na saída, que será reinjetado na entrada inversora.
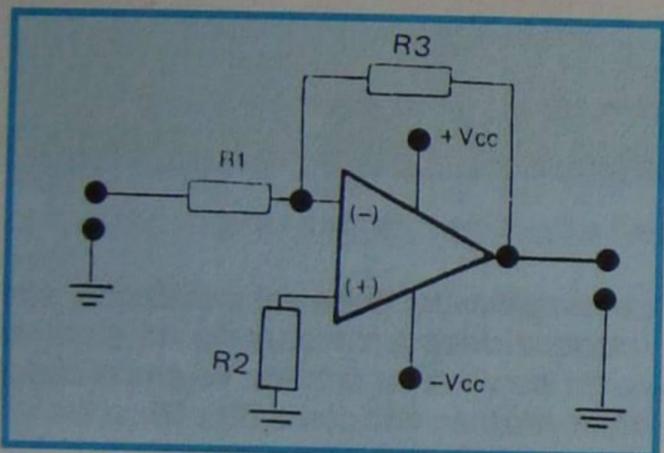
Figura 26 - Amplificador inversor fechado.

Ora, caso injetarmos na entrada inversora um sinal positivo, vamos obter na saída um sinal negativo, do qual apenas uma parcela retornará pelo resistor de realimentação, e fará com que diminua o nível do sinal presente nesta entrada, o que equivale a dizer que, quanto maior a quantidade de sinal realimentado, menor será o ganho.

Pode-se determinar o ganho do operacional nesta configuração, por uma fórmula que, na prática, resume-se na seguinte equação:

$$G_0 = R3 \div R1$$

Para o bom funcionamento, deve-se sempre adotar R1 = R2.

Neste circuito, a impedância de entrada restringe-se ao valor de R1.

Porém, caso for necessário um amplificador que conserve a fase do sinal de entrada, temos a configuração apresentada na **figura 27**, conhecida como amplificador não inversor fechado.
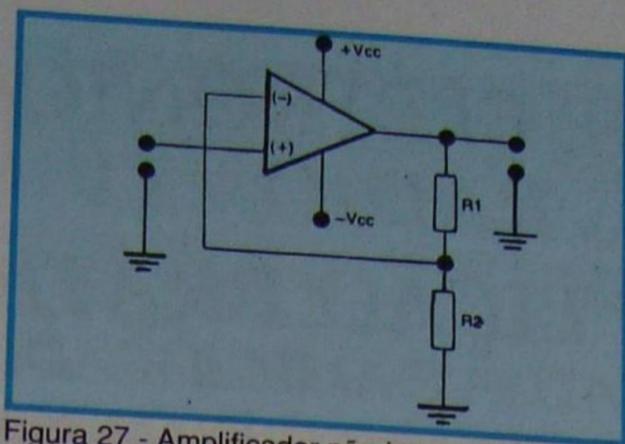
Figura 27 - Amplificador não-inversor fechado.

Neste circuito há realimentação contínua sendo feita pela entrada inversora, porém o sinal é injetado pela entrada não inversora, a qual apresenta, sem o resistor ligado à esta, impedância elevada (cerca de 1 Megohm).

O ganho também é controlável, bastando para isso alterar-se também a quantidade de sinal realimentado pela entrada inversora. A fórmula que define o ganho, nesta configuração, pode ser resumida, para efeitos práticos, na seguinte expressão:

$$G_0 = \frac{R1 + R2}{R2}$$

que pode ser simplificada para:

$$G_0 = \frac{R1}{R2} + \frac{R2}{R2} = 1 + \frac{R1}{R2}$$

Conclui-se que, caso eliminarmos este divisor de tensão e reinjetarmos totalmente o sinal da saída à entrada inversora, teremos um amplificador com ganho unitário, ou seja, que não exerce amplificação alguma.

À primeira vista, tal configuração, mostrada na **figura 28**, aparentemente não possui utilidade alguma, pois, além de não amplificar o sinal presente em sua entrada, não provoca inversão de fase em sua saída. Mas, se lembrarmos que a impedância de entrada deste circuito é muito elevada e que a sua impedância de saída é muito baixa, podemos utilizar esta configuração como isolador entre etapas, caso queiramos transferir um sinal sinal de um estágio para outro sem sobrecarregarmos tais etapas, ou seja, isolando-as.

Esta configuração recebe o nome de seguidor de voltagem, muito utilizada como casadora de impedância.

Até o momento analisamos configurações que amplificam corrente contínua. Como é sabido que, em corrente alternada alteram-se algumas características de impedância, caso queiramos utilizar alguma das configurações apresentadas até o momento, a solução mais adequada é, em qualquer configuração, isolar-se o circuito para a corrente contínua, bastando acrescentar na entrada utilizada e na saída capacitores de desacoplamento. Nestas condições deve-se considerar sempre a reatância capacitiva oferecida pelo componente quanto à faixa de freqüência com que iremos trabalhar. Tal reatância deve ser sempre inferior à oferecida pelos resistores de entrada para não ocorrerem influências na impedância de entrada e no ganho geral do circuito.
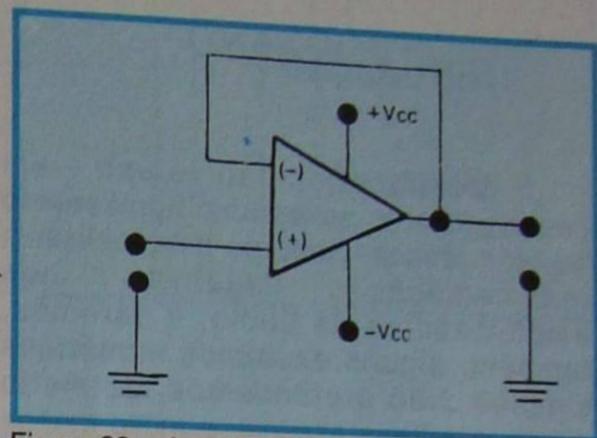
Figura 28 - Amplificador de ganho unitário.

A **figura 29** mostra um circuito somador de três entradas, que é uma maneira de se somar algebricamente três tensões distintas de entrada, cada uma multiplicada por um fator de ganho constante, determinado pelo resistor R4, em conjunto com os demais resistores de entrada.
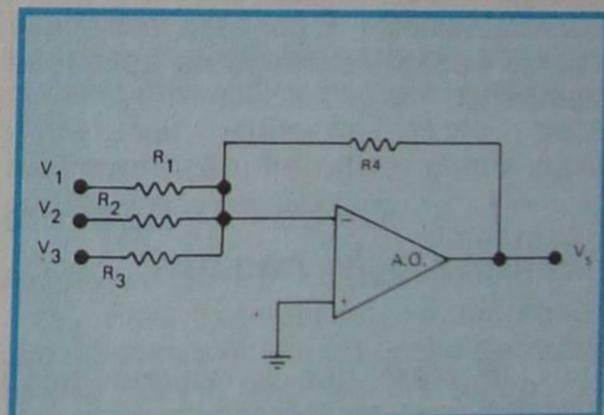
Figura 29 - Circuito somador de três entradas.

A tensão de saída V_S pode ser expressa em termos de entrada, como:

$$V_S = -R_4 \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} \right)$$

A cada entrada corresponde um sinal de saída, da mesma maneira que para o circuito inversor de ganho constante, sendo que essas parcelas aparecem somadas na saída.

CURSO DE ELETRÔNICA BÁSICA RÁDIO - TV
11ª LIÇÃO PRÁTICA
REALIMENTAÇÃO NEGATIVA E AMPLIFICADOR DE SINAL DE ÁUDIO COM CIRCUITOS INTEGRADOS

Introdução

Mostraremos ao aluno, em prosseguimento ao assunto apresentado na lição teórica, como se deve aplicar a realimentação negativa aos amplificadores de áudio, e daremos, também, alguns exemplos numéricos simples. Não pretendemos, de modo algum, esgotar o assunto, e muito menos elevar o nível do curso além da capacidade de assimilação do aluno, para quem ele é dirigido. Nossa intenção tem sido sempre formar e informar sobre radiotécnica, e não simplesmente sobre montagens, pois, para estas, é suficiente um soldador. No atual estágio de desenvolvimento da eletrônica, o técnico reparador não pode ignorar o funcionamento dos circuitos e, além disso, deve estar capacitado a resolvê-los - pelo menos os mais simples - quantitativamente. É por esse motivo que muitas vezes insistimos na aplicação numérica.

I - Onde aplicar a realimentação negativa

É claro que a realimentação negativa deve ser aplicada da saída para a entrada do amplificador. A entrada do transistor é a base, em qualquer circunstância, embora em algumas montagens a fonte de sinal não esteja diretamente ligada a esses terminais. É o caso, por exemplo, da configuração em base à massa em que o sinal é aplicado ao emissor, porém o controle é feito indiretamente pela base.

Certamente, quando o amplificador é de um só estágio, não há problema no retorno do sinal. Entretanto, quando se trata de circuito de vários estágios, é preciso que se tome cuidado na aplicação do sinal de retorno, porque, se a **fase** não for correta, o amplificador entrará em **oscilação.**

Na **figura 30**, mostramos um amplificador de dois estágios, onde a realimentação é feita de maneira **errada**. De fato, o sinal de entrada sofre inversão
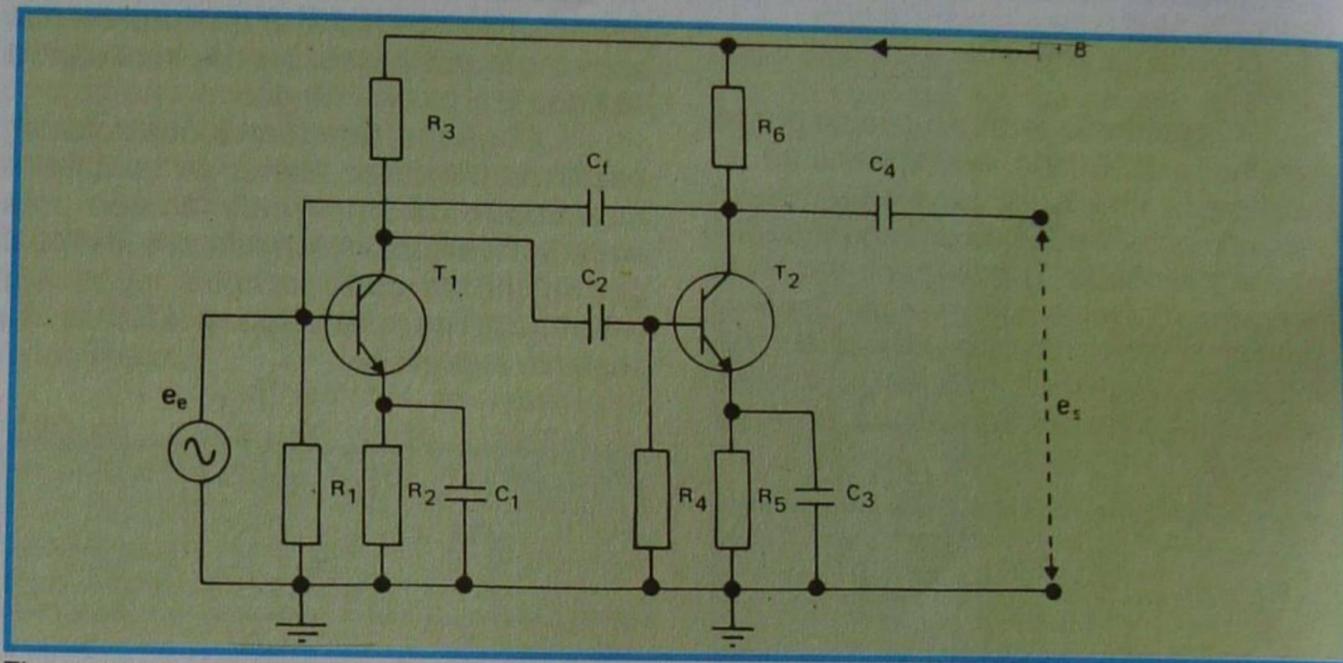
Figura 30 - Exemplo de realimentação positiva.

de fase no primeiro estágio e reinversão no segundo. Isto quer dizer que o sinal de saída fica com fase igual ao de entrada.

Obviamente, retornando o sinal à base, haverá realimentação positiva e o amplificador oscilará. Para evitar isso é suficiente retornar o sinal ao emissor, como mostramos na **figura 31.**

Observa-se que no circuito da figura 31 há realimentação de corrente e de tensão. De fato, a de tensão é proporcionada pelo retorno do sinal através do capacitor C_f e a da corrente pela eliminação do capacitor de emissor do primeiro transistor.

Conclui-se que o desempenho de um amplificador pode ser modificado, sem introduzirmos uma parcela do sinal de saída de volta na entrada do amplificador, como indicam as figuras 30 e 31.

Conforme citado anteriormente, o amplificador apresenta realimentação negativa quando o sinal de realimentação está em oposição ao sinal de entrada. Neste caso, a realimentação diminui a saída do amplificador.

Normalmente, a realimentação negativa é usada em amplificadores de potência. A realimentação negativa, apesar de diminuir a potência final aumenta a faixa de freqüência deste tipo de amplificador e reduz a distorção,
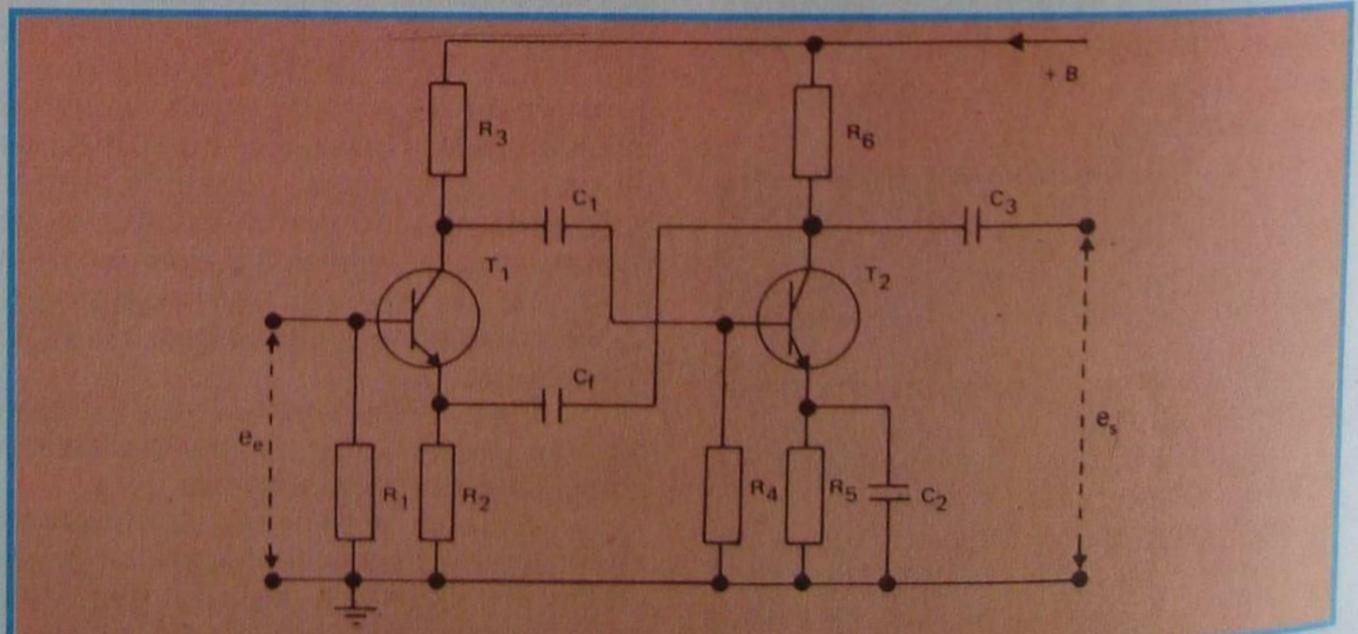
Figura 31 - Exemplo de realimentação negativa.

aumentando a estabilidade do ganho e modificando as resistências de entrada e de saída.

O amplificador apresenta uma realimentação positiva quando o sinal de realimentação está em fase com o sinal de entrada. A realimentação neste caso, provoca um aumento da saída do amplificador.

A realimentação positiva é aplicada, como veremos em momento oportuno, em osciladores. Nesta situação, aumentamos o sinal de entrada e em seguida o amplificamos. Este fenômeno ocorre numa determinada freqüência, que é a freqüência de ressonância do oscilador.

II - Alguns exemplos de cálculos de realimentação

Vamos mostrar ao aluno como se pode determinar, quantitativamente a realimentação em circuitos simples. Com isso, o aluno poderá dimensionar seus próprios circuitos, ou melhorar a qualidade de reprodução de outros já existentes, desde que, é claro, esses circuitos comportem a realimentação.

a) Realimentação e Ganho

Comecemos pelo circuito mostrado na **figura 32**, que consiste em uma etapa amplificadora, composta por um único transistor, representada em forma de bloco.

Esta etapa amplificadora apresenta um ganho de corrente, o qual expressamos por G_i. Tal ganho é considerado como sendo o apresentado pelo circuito **sem realimentação**.

Certamente o aluno se recorda que o ganho era expresso pela fórmula:

$$G_i = \frac{I_o}{I_i}$$

Desta expressão podemos, através de transformações matemáticas, chegar à uma outra expressão conhecida:

$$I_o = G_i \cdot I_i$$

Figura 32 - Bloco amplificador.

Ao introduzirmos uma realimentação negativa, como indica a **figura 33**, temos uma parcela do sinal de saída ligado à entrada do amplificador.

Vamos chamar de fator de realimentação e indicar pela letra grega beta (β), a fração de corrente de saída que é jogada na entrada. O beta (β) possui sempre um valor menor que 1.

Figura 33 - Amplificador com realimentação negativa.

Na entrada do amplificador teremos:

$$i_{if} = i_i - \beta \cdot i_o$$

sendo:

if = corrente de entrada com realimentação.

i_i = corrente de entrada sem realimentação.

β = fator de realimentação.

i_o = corrente de saída.

Vejamos agora como fica a expressão para o ganho de corrente:

$$G_{if} = \frac{i_o}{i_{if}} \Rightarrow G_{if} = \frac{io}{i_i - \beta \cdot i_o}$$

Dividindo os dois termos do segundo membro da equação por i_i, resulta:

$$G_{if} = \frac{\frac{i_o}{i_i}}{\frac{i_i}{i_i} - \frac{\beta \cdot i_o}{i_i}}$$

Teremos então:

$$G_{if} = \frac{G_i}{1 - \beta \cdot G_i}$$

O índice f, que colocamos para indicar o ganho de corrente com realimentação, é decorrente da palavra "feedback", que significa realimentação, em inglês.

A expressão para o ganho de corrente com realimentação é genérica, e pode ser aplicada tanto para realimentação negativa como para realimentação positiva.

No caso da realimentação negativa, o termo $\beta \cdot G_i$ será negativo.

Para exemplificar, vamos supor que um transistor tem um ganho de malha aberta (ganho sem realimentação) de $G_i = 300$.

Se 25% da saída for retirada e conectada à entrada através de uma realimentação negativa, qual será o novo ganho de corrente?

Solução

Vejamos inicialmente qual o valor de beta:

$$\beta = \frac{25}{100} = 0{,}25$$

$$\beta \cdot G_i = 0{,}25 \cdot 300 = 75$$

Como a realimentação é negativa, o termo $\beta . G_i$ é negativo:

$$\beta . G_i = -75$$

Substituindo o valor de $\beta . G_i$ na expressão do ganho de corrente com realimentação, resulta:

$$G_{if} = \frac{300}{1 - (-75)}$$

$$G_{if} = \frac{300}{1 + 75}$$

$$G_{if} \cong 3{,}95$$

Neste exemplo, a realimentação negativa reduziu o ganho de 300 para 3,95.

Em algumas aplicações, a realimentação é expressa em termos de decibel (dB). Neste caso, o decibel é definido como sendo a razão entre o ganho sem realimentação e o ganho com realimentação, conforme indica a expressão:

$$dB_f = 20 . \log \frac{G_i}{G_{if}}$$

No caso do exemplo proposto, a realimentação do circuito, em dB, seria:

$$dB_f = 20 . \log \frac{G_i}{G_{if}}$$

$$dB_f = 20 . \log \frac{300}{3{,}95}$$

$$dB_f = 20 . \log 76$$

$$dB_f = 20 . 1{,}880$$

$$dB_f = 37{,}6 \text{ dB}$$

b) Realimentação e faixa de freqüência

Para que possamos compreender a influência da realimentação sobre a resposta de freqüências de um amplificador, temos que, primeiramente, compreender perfeitamente como se define a faixa de freqüências de um amplificador.

> A largura de faixa ou faixa de passagem de freqüência de um amplificador é o intervalo de freqüências de sinal onde a potência do sinal de saída permanece acima do valor de meia potência.

Dizendo de outro modo, a largura de faixa de um amplificador é o intervalo de freqüência para o qual a potência do sinal se mantém acima da metade do seu valor máximo, conforme o aluno observa pela **figura 34**.
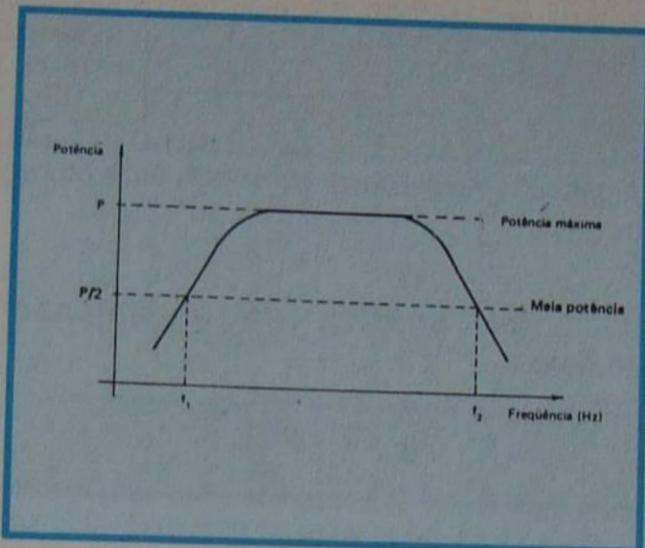
Figura 34 - Largura de faixa de um amplificador hipotético.

Para áudio, que é a faixa de freqüência do ouvido humano, a faixa de passagem deve estar compreendida entre 20 Hz e 20 kHz. Desta maneira, um amplificador de alta fidelidade deverá ter, no mínimo, uma curva de resposta similar a da **figura 35**.
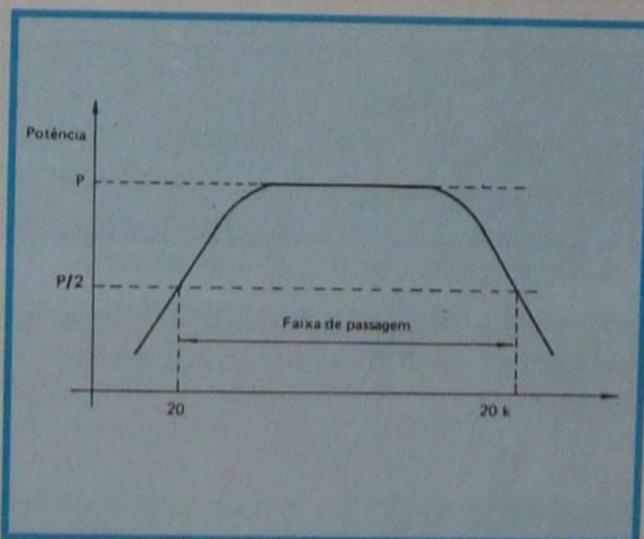
Figura 35 - Curva de resposta de um amplificador de alta fidelidade (hipotético).

Para uma carga resistiva, a potência é dada pela expressão:

$$P = \frac{V^2}{R}$$

Podemos então determinar o valor da tensão correspondente ao valor de meia potência, a partir da relação entre o valor da meia potência (P_1) e a potência máxima (P):

$$P_1 = \frac{1}{2} P \quad \text{ou} \quad \frac{P_1}{P} = \frac{1}{2}$$

De onde se conclui, pela Lei de Ohm:

$$P_1 = \frac{V_1^2}{R} \quad \text{e} \quad P = \frac{V^2}{R}$$

Portanto, a relação entre as potências pode ser escrita da seguinte maneira:

$$\frac{P_1}{P} = \frac{\frac{V_1^2}{R}}{\frac{V^2}{R}} \Rightarrow \frac{P_1}{P} = \frac{V_1^2}{V^2}$$

$$\left(\frac{P_1}{P}\right) = \left(\frac{V_1}{V}\right)^2$$

Mas como $\frac{P_1}{P} = \frac{1}{2}$, resulta:

$$\left(\frac{V_1}{V}\right)^2 = \frac{1}{2} \Rightarrow \frac{V_1}{V} = \sqrt{\frac{1}{2}}$$

$$\frac{V1}{V} = \frac{\sqrt{1}}{\sqrt{2}} \Rightarrow \frac{V1}{V} = \frac{1}{1{,}414} = 0{,}707$$

Conclui-se, portanto, que em relação aos valores de tensão, os pontos de meia potência correspondem a uma divisão por $\sqrt{2}$ ou a um valor de 70,7% do máximo valor de tensão.

Para estabelecer uma relação entre dois valores de uma mesma grandeza utiliza-se o decibel. Portanto, para relacionar-se duas potências entre si utiliza-se a fórmula:

$$dB = 10 \cdot \log \frac{P_1}{P}$$

onde:
dB = decibel
log = logaritmo decimal
P e P_1 = potências

Aplicando para o nosso caso, temos:

$$dB = 10 \cdot \log \frac{1}{2}$$

$$dB = 10 \cdot \log 0,5$$

Consultando uma tabela de logaritmos, encontramos, para log 0,5 o valor de - 0,301. Como não necessitamos de muita precisão, adotaremos apenas - 0,3:

$$dB = 10 \cdot (-0,3) = -3dB$$

Outra fórmula muito empregada para definir-se a relação em decibéis entre duas potências, e que envolve apenas os valores das tensões relacionadas a estas potências, é a seguinte:

$$dB = 20 \cdot \log \left(\frac{V_1}{V}\right)$$

Aplicando a expressão acima, de uma maneira genérica, temos:

$$\frac{V_1}{V} = \frac{1}{1,414} = 0,707$$

Se recordarmos que:

$$\frac{V_1}{V} = \frac{1}{1,414} = 0,707$$

podemos aplicar este valor na fórmula anterior, quando então obteremos:

$$dB = 20 \cdot \log (0,707)$$

Consultando uma tabela de logaritmos, encontraremos, para log 0,707, o valor de - 0,150. Substituindo-o na fórmula, teremos:

$$dB = 20 \cdot (-0,150) = -3 \text{ dB}$$

Donde se conclui que:

A largura de faixa de um amplificador é o intervalo de freqüência para o qual a potência de saída ou a tensão em saída cai 3 dB do seu valor máximo.

Curva de resposta em freqüência de um amplificador é a curva da tensão de sinal de saída do amplificador em função da freqüência.

Para um amplificador de áudio genérico, teremos a curva mostrada na **figura 36**.
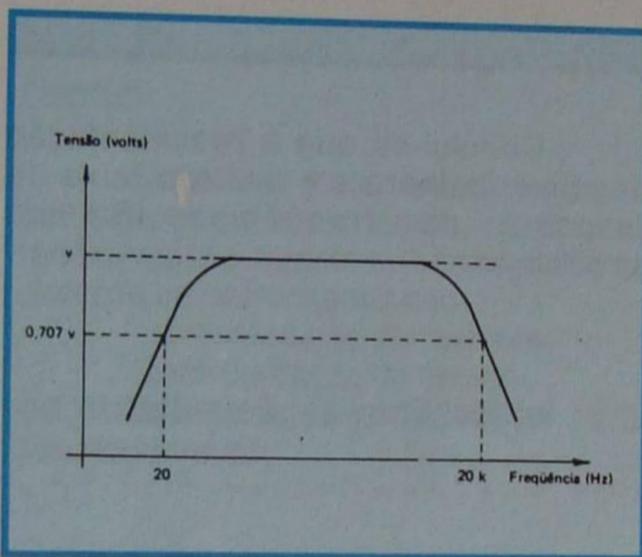
Figura 36 - Curva de resposta de freqüência de um amplificador genérico.

Podemos também representar a curva de resposta em termos de ganho conforme exemplificado na representação da **figura 37**.
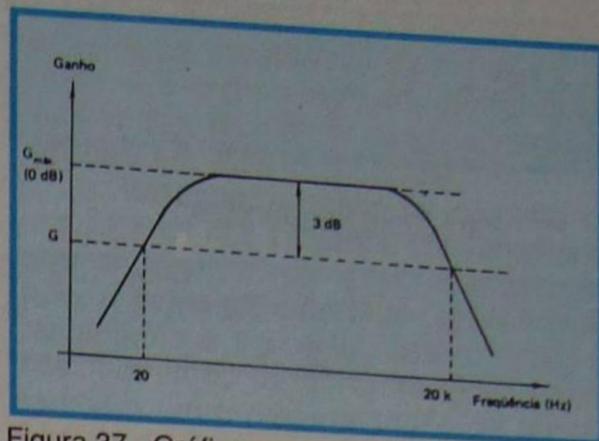
Figura 37 - Gráfico - ganho pela freqüência.

Assim, a largura de faixa de um amplificador é o intervalo de freqüência para o qual o ganho do amplificador cai 3 dB do seu valor máximo.

Observe a figura 37. Note que para baixas freqüências o ganho cai. Isto ocorre devido às redes de casamento que incluem capacitores em série.

Para as altas freqüências, o ganho também cai. Neste caso, esta queda é devida às reatâncias capacitivas do coletor e da própria fiação do circuito (capacitâncias parasitas que aparecem em paralelo com a carga).

A partir destas considerações, podemos analisar o que ocorre a um amplificador, em relação à resposta de freqüência, quando aplicamos ao mesmo uma realimentação negativa. Para isto, comparemos as curvas apresentadas na **figura 38**.

Quando aplicamos uma realimentação negativa, aumenta a largura da faixa do amplificador.

Os novos valores das freqüências
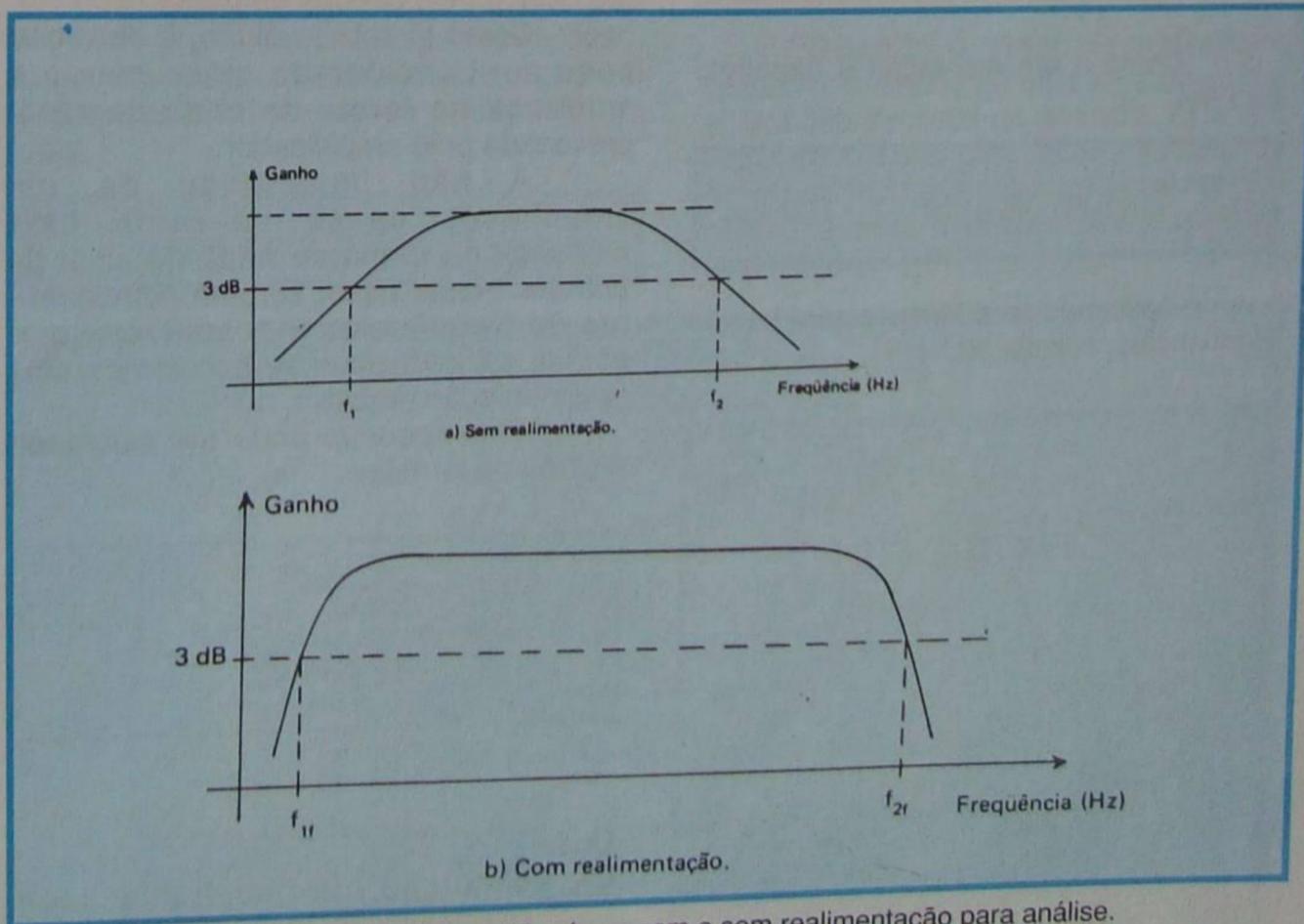
Figura 38 - Curvas de resposta de amplificadores com e sem realimentação para análise.

de corte serão dadas por:

Para baixas freqüências:

$$f_{1f} = \frac{f_1}{1 - \beta \cdot G_i}$$

Para altas freqüências:

$$f_{2f} = (1 - \beta \cdot G_i) \cdot f_2$$

onde:

f_1 = freqüência de corte para baixas freqüências (sem realimentação)

f_2 = freqüência de corte para altas freqüências (sem realimentação)

f_{1f} = freqüência de corte para baixas freqüências (com realimentação)

f_{2f} = freqüência de corte para altas freqüências (com realimentação)

Para uma melhor compreensão, vamos apresentar um exemplo de cálculo:

Um amplificador apresenta um ganho em malha aberta, (G_i) igual a 100, e um fator de realimentação (β) igual a 0,1. As freqüências de corte sem realimentação são: f_1 = 250 Hz e f_2 = 5 KHz. Calculemos as freqüências de corte com realimentação (f_{1f} e f_{2f}), quando o amplificador é sujeito a uma realimentação negativa:

Solução:

$$\beta \cdot G_i = 100 \cdot 0{,}1 \Rightarrow \beta \cdot G_i = 10$$

Como a realimentação é negativa, tem-se:

$$\beta \cdot G_i = -10$$

Aplicando-se a fórmula para baixas freqüências, calcula-se f_{1f}:

$$f_{1f} = \frac{f_1}{1 - \beta \cdot G_i}$$

$$f_{1f} = \frac{250}{1 - (-10)}$$

$$f_{1f} = \frac{250}{1 + 10}$$

$$f_{1f} = \frac{250}{11} = 22{,}727 \text{ Hz}$$

Para calcular-se o novo limite superior da faixa, aplica-se a fórmula para f_{2f}:

$$f_{2f} = (1 - \beta \cdot G_i) \cdot f_2$$

$$f_{2f} = [1 - (-10)] \cdot 5000$$

$$f_{2f} = [1 + 10] \cdot 5000$$

$$f_{2f} = 11 \times 5000 = 55.000 \text{ Hz}$$

$$f_{2f} = 55 \text{ KHz}$$

Conclui-se que a realimentação negativa melhora em muito a faixa de resposta de freqüência de um amplificador.

c) Realimentação e distorção

Vimos que a realimentação negativa pode aumentar a faixa de passagem de freqüência (ou largura de faixa) de um amplificador.

Outra vantagem da realimentação negativa é a redução da distorção provocada pelo circuito amplificador.

Como já sabe o aluno, a distorção pode ser considerada como sendo a mudança na forma de onda do sinal provocada pelo amplificador.

A não linearidade de um amplificador causa, na saída, uma mudança na forma de onda do sinal de entrada. Neste caso, surgem componentes de freqüências indesejáveis, que podem ser reduzidas se aplicarmos uma realimentação negativa.

Esta redução pode ser calculada através da fórmula:

$$D_{of} = \frac{D_o}{1 - \beta \times G_i}$$

Onde:

D_{of} = distorção da amplitude (com realimentação) em porcentagem.

D_o = distorção original, antes da realimentação, em porcentagem.

Como exemplo, vamos supor que o mesmo amplificador da situação anterior apresentasse, antes da realimentação, uma distorção de 15%. Sendo seu $\beta \cdot G_i$ = - 10, sua distorção, após a realimentação, passará a ser de:

$$D_{of} = \frac{D_o}{1 - \beta \times G_i}$$

$$D_{of} = \frac{15}{1 - (-10)}$$

$$D_{of} = \frac{15}{1 + 10}$$

$$D_{of} = \frac{15}{11}$$

$$D_{of} \cong 1{,}4\%$$

Cabe aqui fazermos uma observação muito importante:

A realimentação negativa reduz consideravelmente a distorção gerada pelo próprio amplificador. Porém, qualquer distorção já existente no sinal de entrada no amplificador não será eliminada ou reduzida. A distorção, neste caso, também é amplificada.

d) Estabilização do ganho

Conforme já citamos em outras aulas, as variações de temperatura afetam os parâmetros "h" do transistor. Para que a operação do circuito se torne independente destas mudanças, usa-se a realimentação.

Verifiquemos o porquê desta reafirmação.

Considere a expressão do ganho com realimentação negativa:

$$G_{if} = \frac{G_i}{1 - \beta \times G_i} \qquad (1)$$

Se o produto $\beta \times G_i$ for muito maior do que 1, ou seja, $\beta \times G_i \gg 1$, podemos desconsiderá-lo. A expressão é simplificada para:

$$G_{if} = \frac{G_i}{\beta \times G_i}$$

Então, o ganho de corrente para a realimentação negativa será dado pela expressão simplificada:

$$G_{if} = \frac{1}{\beta} \qquad (2)$$

Isto equivale a dizer que o ganho independe propriamente do transistor e, portanto, a operação do circuito não é praticamente afetada por variações de temperatura, as quais comprometem os parâmetros do transistor.

Então, quando o produto $\beta \times G_i \gg 1$, a realimentação negativa de um amplificador independe do transistor, isto é, não depende dos parâmetros "h" do transistor.

Para ilustrar, vamos propor um exemplo:

Um amplificador com ganho de corrente $G_i = 500$ é submetido a uma realimentação negativa de 15%. Calcular o ganho com realimentação através das fórmulas (1) e (2), e comparar os resultados obtidos.

Solução empregando a fórmula (1):

$$G_{if} = \frac{G_i}{1 - \beta \times G_i}$$

$$G_{if} = \frac{500}{1 - 0{,}15 \times (-500)}$$

Obs.: Lembre-se que, por se tratar de realimentação negativa, devemos considerar o produto $\beta \times G_i$ (ou um de seus membros) como sendo negativo. Prosseguindo com os cálculos, teremos:

$$G_{if} = \frac{500}{1 + 75}$$

$$G_{if} = \frac{500}{76} = 6{,}57$$

Caso empregarmos a fórmula (2), obteremos o seguinte resultado:

$$G_{if} = \frac{1}{\beta}$$

$$G_{if} = \frac{1}{0{,}15}$$

$$G_{if} \cong 6{,}67$$

Podemos observar que os resultados divergem muito pouco, sendo bem próximos entre si e, portanto, verificamos que o produto $\beta \times G_i \gg 1$ pode estabilizar o ganho contra variações nos parâmetros dos transistores.

III - Tipos de realimentação

Conforme já foi mencionado em outra parte de nosso curso, os tipos de realimentação negativa, empregados em circuitos transistorizados são:

- realimentação de corrente.
- realimentação de tensão.

Veremos, agora, cada qual separadamente.

a) Realimentação de corrente

Um método normalmente usado para desenvolver um sinal realimentado é mostrado na **figura 39**.

O sinal da corrente alternada, após amplificado, atravessa o resistor de emissor R_E e desenvolve, nesse caso, uma tensão realimentada que é proporcional à corrente do emissor i_E, ou seja:

$$V_E = i_E \cdot R_E$$

Este tipo de realimentação, como é do conhecimento do aluno, é chamado de realimentação de corrente.

A realimentação de corrente reduz o ganho de tensão do amplificador, aumenta as resistências de entrada e de saída e amplia a largura de faixa de freqüências (aumenta, especialmente, a resposta em altas freqüências).

Contudo, o ganho de corrente do amplificador não se altera, contrariamente ao que pode parecer à primeira vista. De fato, o aluno pode verificar, observando novamente a figura 39, que o efeito da realimentação de corrente desenvolve, também, uma realimentação de tensão através de R_E.

Considere o instante que o sinal de entrada é positivo.

Este sinal tende a aumentar a polarização do transistor e, como conseqüência, a corrente do emissor i_E e a corrente do coletor i_C também aumentam.

Este aumento da corrente do emissor faz com que o emissor fique mais **positivo em relação ao terra**. Esta tensão mais positiva atua em oposição ao sinal da tensão de polarização entre base e emissor, conforme já tivemos oportunidade de verificar em outra lição.

Como resultado, a tensão V_{BE} diminui. Então, a tensão V_{BE} diminui por causa da tensão do emissor.

Podemos escrever que, com o sinal de entrada v_i e realimentação, a tensão entre base e emissor, durante todo o ciclo positivo do sinal de entrada, é dada pela fórmula:

$$V_{BE} = v_i - i_E \cdot R_E$$

Quando o sinal de entrada é negativo, a tensão do emissor atua contra a redução do sinal de entrada. Esta é a ação do circuito pelo qual a tensão do emissor fornece uma realimentação negativa para a entrada do transistor amplificador.
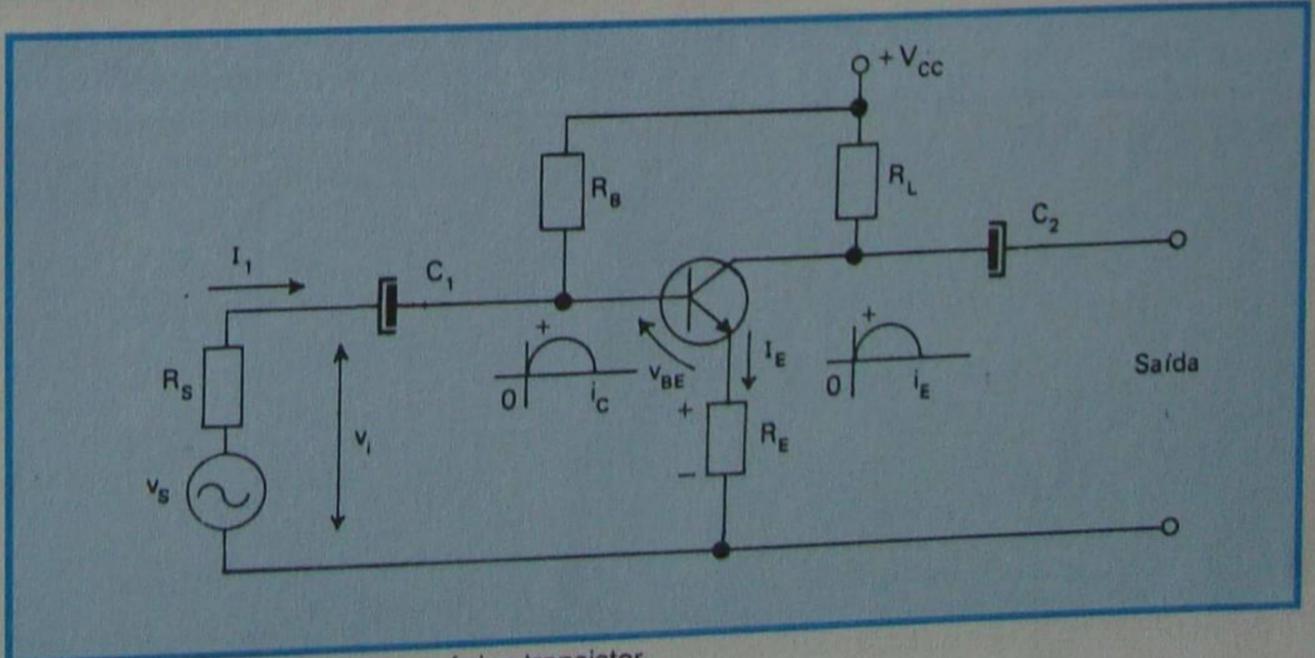
Figura 39 - Amplificador com um único transistor.

Já vimos que, caso colocarmos em paralelo ao resistor R_E um capacitor C_E suficientemente alto, o capacitor agirá como um curto-circuito para as correntes alternadas, presentes no emissor, ao terra, eliminando qualquer realimentação de corrente alternada.

Contudo, a corrente contínua do emissor, através do resistor de emissor, desenvolve uma espécie de realimentação contínua de corrente que se opõe a qualquer alteração devida aos efeitos da temperatura ou substituição do componente, pois o valor de R_E, por ser muito maior que o apresentado pela junção base-emissor, quando polarizada diretamente, fixa o valor da corrente circulante.

Em muitos circuitos, a relação entre entrada, saída e realimentação faz com que se torne difícil e complicada a determinação do fator de realimentação (β). Entretanto, existe um método simplificado para o cálculo do fator de realimentação que se utiliza do circuito equivalente híbrido (note que o circuito de entrada contém o gerador de tensão dependente, enquanto que a saída contém uma fonte de corrente dependente, conforme mostrado nas **figuras 40** e **41**). Vejamos como é este método considerando inicialmente os circuitos das figuras 40 e 41.

Nos circuitos dessas figuras desprezaremos o valor de h_{re}, pois ele é muito pequeno quando comparado com os demais elementos do circuito. O parâmetro h_{oe} também será desprezado, pois a resistência $\frac{1}{h_{oe}}$ é, normalmente, mais elevada que o valor de RL (resistência de carga).

Na figura 40 temos o circuito híbrido modificado, considerando as aproximações feitas.

O aluno não deve preocupar-se, de imediato, com a assimilação plena do modelo híbrido. Para o momento basta compreender que o mesmo considera o circuito de entrada (base-emissor) e o circuito de saída (coletor-emissor) como sendo dois circuitos dependentes.

O resistor de emissor deve ser considerado, devido ao efeito da realimentação no circuito de entrada.

Baseando-se no circuito da figura 40, temos:

Resistência de entrada:

$$R_{if} = h_{ie} + (1 + h_{fe}) \cdot R_e$$

Ganho de tensão:

$$G_{vf} = - h_{fe} \cdot \frac{R_L}{R_{if}}$$

Ganho de corrente:

$$G_{if} = h_{fe}$$

Para o desenvolvimento da equação de resistência de saída do amplificador com realimentação de corrente, usamos o circuito da figura 41.

Neste caso, o parâmetro h_{re} é novamente desprezado, porque é muito pequeno quando comparado com os demais elementos do circuito. Já o parâmetro h_{oe} deve ser considerado, para prevenir erro nos resultados. Consideramos, novamente, o resistor de emissor R_e devido ao efeito da realimentação no circuito de entrada.

A resistência de saída é determinada anulando-se o sinal de entrada da fonte, mantendo-se a resistência da fonte (R_S) conectada.

A tensão V_2 deve ser considerada e aplicada na saída do transistor. Desse modo, a resistência de saída é dada pela relação:

$$R_o = \frac{V_2}{i_2}$$

A sua equação final será:

$$R_o = \frac{1}{h_{oe}} \cdot \left[1 + \frac{R_e\,(h_{fe} + R_S \cdot h_{oe} + h_{ie} \cdot h_{oe})}{R_S + h_{ie} + R_e}\right]$$

Figura 40 - Circuito híbrido modificado.
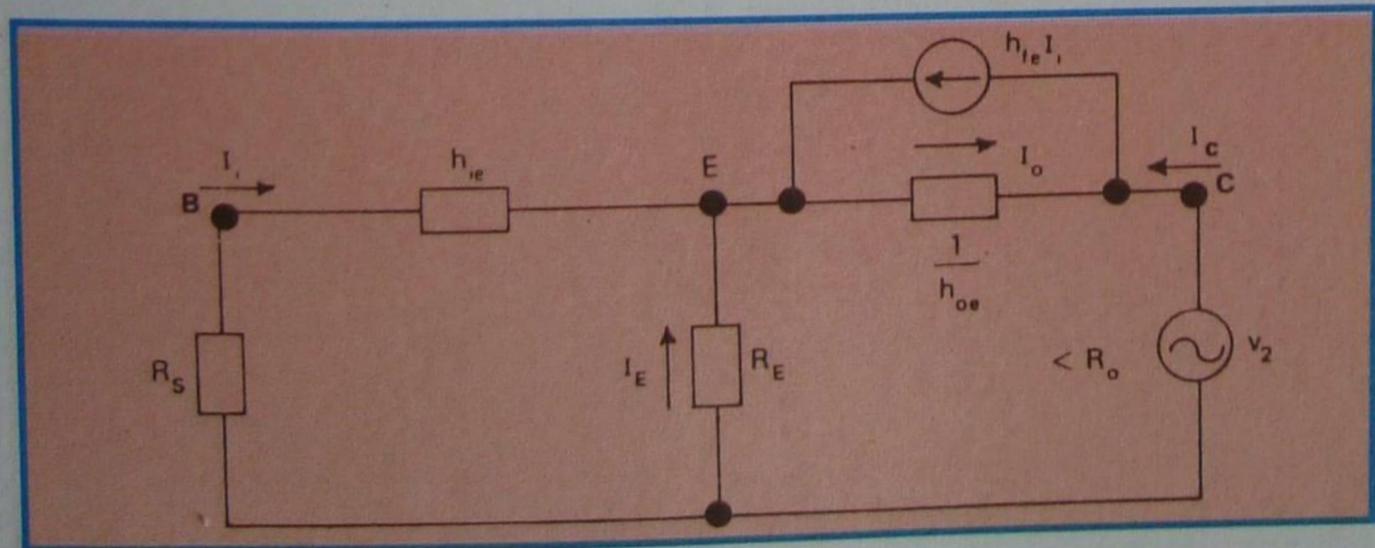
Figura 41 - Circuito para cálculo da resistência de saída.

Exemplo:

Um transistor tem os seguintes parâmetros "h":

$h_{ie} = 3150\ \Omega$ $\quad h_{oe} = 6{,}2 \times 10^{-6}\Omega^{-1}$

$h_{fe} = 150$ $\quad h_{re} = 1{,}65 \times 10^{-4}$

Este transistor é usado em um amplificador como o da **figura 42**. Calcular R_{if}, G_{vf} e R_o.

Solução:

Cálculo de R_{if}

$$R_{if} = h_{ie} + (1 + h_{fe}) \times R_e$$

$$R_{if} = 3150 + (1 + 150) \times 2200$$

$$R_{if} = 335.950\ \Omega$$
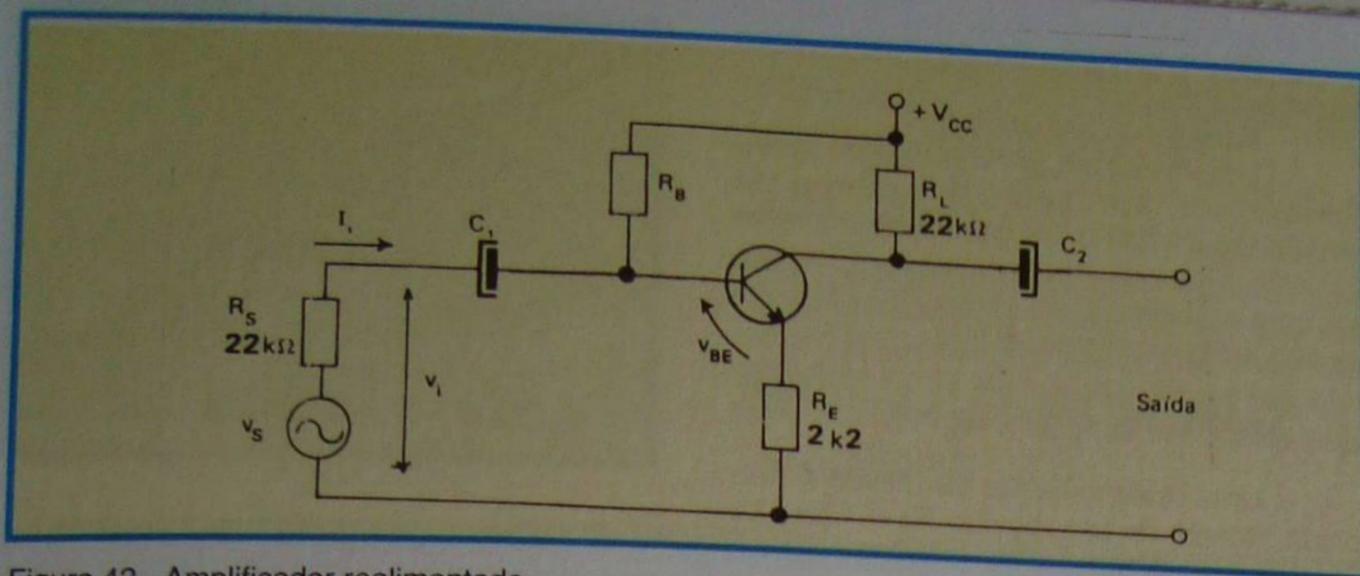
Figura 42 - Amplificador realimentado.

Cálculo de G_{vf}

$$G_{vf} = - hfe \; . \; \frac{R_L}{R_{if}}$$

$$G_{vf} = - 150 \times \frac{22.000}{335.950}$$

$$G_{vf} = - 9{,}82$$

Cálculo de R_o

$$R_o = \frac{1}{h_{oe}} \cdot \left[1 + \frac{R_e\,(h_{fe} + R_S \, . \, h_{oe} + h_{ie} \cdot h_{oe})}{R_S + h_{ie} + R_e} \right]$$

$$R_o = \frac{1}{6{,}2 \times 10^{-6}} \cdot \left[1 + \frac{2.200 \times (150 + 22.000 \times 6{,}2 \times 10^{-6} + 3.150 \times 10^{3} \times 6{,}2 \times 10^{-6})}{22.000 + 3.150 + 2.200} \right]$$

$$R_o = \frac{1}{6{,}2 \times 10^{-6}} \, . \, (1 + 12{,}081)$$

$$R_o \cong 2{,}1 M\Omega$$

Considerando $(R_S \cdot h_{oe} + h_{ie} \cdot h_{oe}) \cong 0$, pois são valores muito pequenos, temos:

$$R_o = \frac{1}{h_{oe}} \times \left[1 + \frac{h_{fe} \, . \, R_e}{R_S + h_{ie} + R_e} \right]$$

Esta expressão é, normalmente, chamada equação de R_o simplificada.

b) Realimentação de tensão

Caso conectemos o resistor R_f do coletor para a base do transistor, como indica o circuito da **figura 43**, teremos um sinal realimentado, o qual é proporcional ao sinal de saída. Este tipo de realimentação é conhecido por realimentação de tensão (ou "shunt feedback", em inglês).

Consideremos o semiciclo em que o sinal de entrada é positivo e está aumentando de valor. Devido à polarização do transistor, este aumento da polarização aumenta a corrente do coletor, resultando na queda da tensão do coletor. Esta queda na tensão do coletor causa uma redução na corrente que flui através da resistência R_f e, conseqüentemente, uma diminuição na polarização do transistor.

O sinal desta realimentação negativa se opõe ao efeito do sinal de entrada. Esta é, basicamente, a ação da realimentação negativa de tensão.

O resultado obtido da realimentação de tensão (ou "shunt feedback"), na atuação do amplificador, é a redução das resistências de entrada e de saída, além da redução do ganho de corrente. O ganho de tensão não é afetado por uma realimentação de tensão sempre que o ganho de corrente é reduzido.

Figura 43 - Amplificador realimentado.

Quando em operação,a corrente de entrada tende a fluir através de um resistor de realimentação equivalente (R_{fi}), que atua como baixa resistência, curto-circuitando o sinal de fonte de alimentação. A corrente do sinal de saída vai fluir através de um resistor de realimentação (R_{fo}) conectado entre o coletor e a terra.

É importante lembrar que os resistores R_{fi} e R_{fo} (na figura 44) apresentam um efeito equivalente ao do resistor R_f conectado entre o coletor e a base do transistor do circuito da figura 43.

Através da análise com circuitos equivalentes, obtemos as seguintes
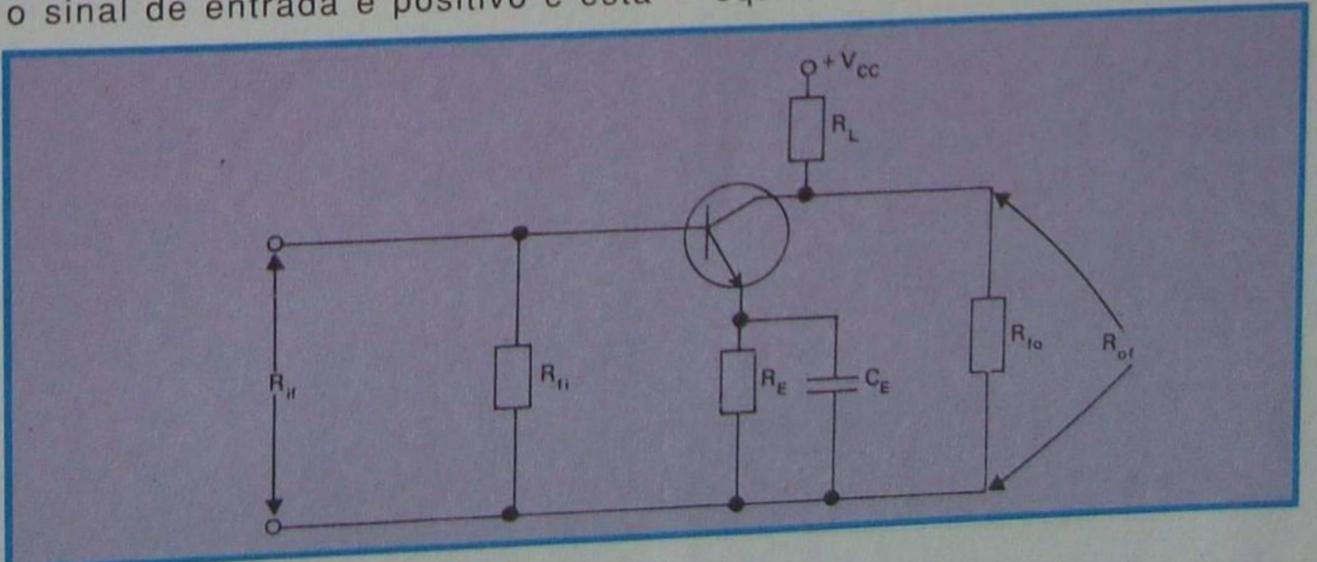
Figura 44 - Amplificador realimentado.

expressões para R_{fi} e R_{fo}:

$$R_{f_i} = \frac{R_f}{1 - G_V}$$

$$R_{f_o} = \frac{R_f}{1 - \frac{1}{G_V}}$$

As expressões 1 e 2 são válidas somente para amplificadores em configuração emissor-comum com realimentação negativa através de R_f, como mostrado anteriormente.

O ganho de tensão G_V sem realimentação pode ser determinado através da equação:

$$G_V = - G_i \times \frac{R_L}{h_{ie}}$$

OBS: O resultado do ganho de tensão G_v, quando negativo, indica que houve inversão de fase do sinal.

O resistor equivalente R_{fi}, que coloca a resistência de entrada do transistor em curto, faz com que a resistência total de entrada fique menor que a resistência de entrada h_{ie} sem realimentação.

Assim, a resistência de entrada do circuito com realimentação (R_{if}) é determinada através da associação em paralelo dos resistores h_{ie} e R_{f_i}, dada pela expressão:

$$R_{if} = \frac{h_{ie} \times R_{fi}}{h_{ie} + R_{fi}}$$

Certamente a realimentação de tensão reduz o ganho de corrente. Isto ocorre porque o resistor R_{fi} absorve uma parcela da corrente do sinal de entrada (i_i) e uma parcela da corrente de entrada na base do transistor (i_b). O fator desta redução é dado pela seguinte expressão:

$$\frac{i_b}{i_i} = \frac{R_{fi}}{h_{ie} + R_{fi}}$$

O ganho de corrente com realimentação é calculado através da seguinte equação:

$$G_{if} = \frac{R_{fi}}{h_{ie} + R_{fi}} \times G_i$$

G_i = ganho de corrente sem realimentação.

Vamos dar um exemplo:

Um transistor, em montagem emissor-comum, apresenta um ganho de tensão $G_V = -100$ e um ganho de corrente $G_i = 50$, antes da realimentação. Ele possui uma resistência de carga $R_L = 6\ K\Omega$ e os seguintes parâmetros "h":

$h_{ie} = 3.000\Omega$ $h_{fe} = 50$ $h_{oe} = 6 \times 10^{-5}\Omega^{-1}$

Uma realimentação de tensão é realizada através de um resistor $R_f = 120\ K\Omega$. Calculemos o ganho de corrente G_{if}, a resistência de entrada R_{if} e a resistência de saída R_{of}.

Solução:

$$R_{fi} = \frac{R_f}{1 - G_v} \Rightarrow R_{fi} = \frac{120 \times 10^3}{101}$$

$$R_{fi} \cong 1.190\ \Omega$$

$$R_{f_o} = \frac{R_f}{1 - \frac{1}{G_v}} \Rightarrow R_{fo} \frac{120 \times 10^3}{1 + \frac{1}{100}}$$

$$R_{f_o} \cong 119\ k\Omega$$

$$G_{if} = \frac{R_{fi}}{R_{fi} + h_{ie}} \times G_i$$

$$G_{if} = \frac{1.190}{1.190 + 3.000} \times 50$$

$$G_{if} \cong 14{,}2$$

$$R_{if} = \frac{h_{ie} \cdot R_{fi}}{h_{ie} + R_{fi}}$$

$$R_{if} = \frac{3.000 \times 1.190}{3.000 + 1.190}$$

$$R_{if} \cong 852\Omega$$

$$R_o = \frac{1}{h_{oe}}$$

$$R_o = \frac{1}{6 \times 10^{-5}}$$

$$R_o \cong 16{,}7\ .\ 10^3\Omega$$

$$R_{of} = \frac{R_o \times R_{fo}}{R_o + R_{fo}}$$

$$R_{of} = \frac{16{,}7 \times 10^3 \times 119 \times 10^3}{16{,}7 \times 10^3 + 119 \times 10^3}$$

$$R_{of} \cong 14{,}7\ K\Omega$$

Este exemplo mostra que conseguimos, através de uma realimentação de tensão, reduzir o ganho de corrente de 50 para 14,2 sem reduzir significativamente a resistência de saída e o ganho de tensão.

Esta redução do ganho de corrente faz com que o amplificador fique estabilizado contra variações nos parâmetros "h" do transistor, causadas por mudanças de temperatura.

AMPLIFICADOR DE SINAL DE ÁUDIO COM CIRCUITOS INTEGRADOS

O amplificador operacional é composto de vários estágios de amplificadores diferenciais em um único circuito integrado (CI).

Vimos na lição teórica que as características básicas do A.O. ideal são: ganho de tensão infinito, impedância de entrada infinita e impedância de saída nula. A construção do CI requer o uso de componentes com o menor tamanho possível (maioria transistores), para a construção de um a quatro A.Os. em um único CI.

É óbvio que, devido ao emprego de componentes **reais** para a construção de CIs, nem sempre as características **ideiais** são obtidas.

Para melhor compreensão do que foi exposto, faremos um paralelismo entre um operacional ideal e um exemplo real, no caso o 741.

I - Amplificador Operacional - CI 741

A **figura 45** mostra o diagrama interno do circuito, e a **figura 46** o diagrama de conexões de um A.O. 741.

O 741 é um componente cuja circuitagem interna apresenta as seguintes características:
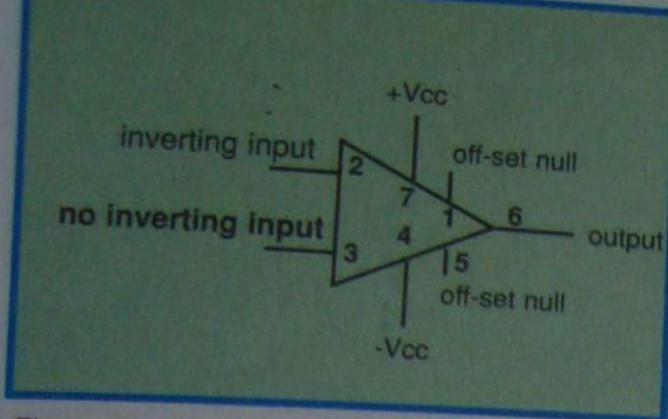
Figura 46 - Diagrama de conexões do 741.

$V_{ccmáx}$. (máxima tensão de alimentação): o valor dessa tensão deve ser simétrica de 18 V/0V/-18V.

$V_{smáx}$. (máxima tensão de saída): 14 V/0V/-14V.

Convém neste item salientar que os amplificadores operacionais não são amplificadores de corrente, mas sim amplificadores de tensão o que faz com que a potência máxima de saída seja algo inferior a 500 mW.

Figura 45 - Diagrama interno do 741.

Z_e (impedância de entrada): em um amplificador operacional **ideal** essa impedância deveria ser infinita para que este não cause influência no funcionamento do circuito em que suas entradas estiverem conectadas. Porém, em um circuito operacional **real** isto não é possível, sendo a impedância de entrada do 741 algo em torno de 1 Megohm.

Z_s (impedância de saída): conforme o caso anterior, o **ideal** seria que a impedância de saída op-amp (do inglês "OPERATIONAL AMPLIFIERS") fosse nula; porém a impedância de saída do 741 apresenta um valor de aproximadamente 150 ohms, portanto, muito baixo.

G_o (ganho sem realimentação): novamente temos o confronto entre o ganho **ideal**, que deveria ser infinito, com o ganho **real**, que nos 741 se aproxima de 100 dB (algo em torno de 100.000 vezes).

FT (Freqüência de transição): no op-amp **ideal** esta freqüência deveria ser infinita; no 741 esta é de 1MHz.

I_b (corrente de polarização de entrada): o valor dessa corrente no op-amp **ideal** deveria ser nula, enquanto que, no 741, é de 200 nA.

Reafirmando as divergências existentes entre o amplificador operacional real e o ideal, convém frisar que, graças ao fato de um circuito com tal grau de complexidade ser confeccionado de forma integrada, é de se esperar que ocorram pequenas discrepâncias de características dos componentes, o que pode ser considerado como tolerância dos mesmos.

Com isso, caso efetuarmos as ligações apresentadas na **figura 47**, deveremos obter na saída a tensão de 0 V, já que o amplificador operacional entrega em sua saída a **diferença entre as tensões presentes em suas entradas, multiplicadas pelo ganho;** como no caso esta diferença entre os sinais de entrada é zero a saída deveria apresentar tensão igual a zero, seja qual for o ganho.
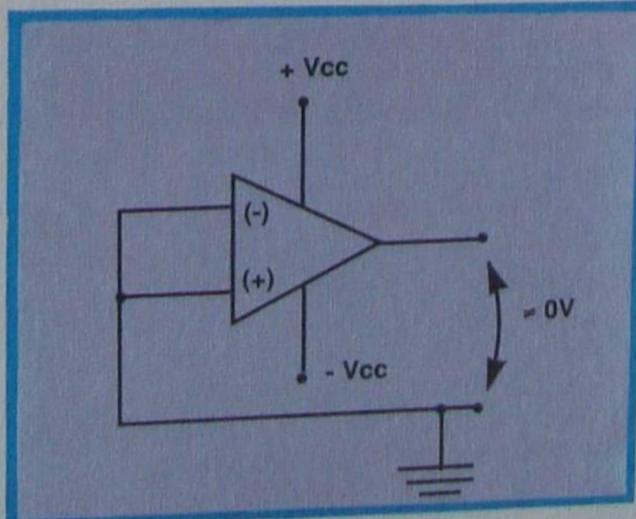
Figura 47 - No op-amp. real não obteremos 0V na saída, mesmo com tensões idênticas em ambas as entradas.

Porém isso não acontece na prática, devido aos problemas de tolerância dos componentes, comentado anteriormente, aliado ao elevado ganho do circuito.
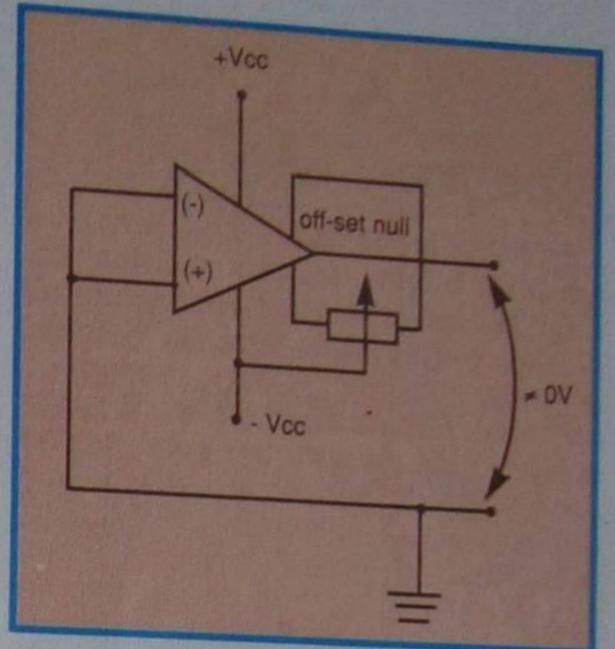
Figura 48 - Emprego das saídas off-set null.

Em certas aplicações isto não significa realmente um problema, porém, em circuitos que necessitem de maior precisão podemos corrigir isto, fazendo-se uso das saídas off-set null, conforme indicado na **figura 48**.

O trimpot ilustrado nesta figura, conforme seu ajuste, aproxima mais ou menos os emissores de Q5 ou Q6 ao negativo, alterando portanto suas polarizações e, conseqüentemente, o ganho das entradas do 741. Com isto pode-se tornar o ganho da entrada inversora igual ao da entrada não inversora, fazendo com que sua saída apresente zero Volt.

Tal possibilidade de ajuste, aliada à confiabilidade de sua circuitagem e suas características elétricas, fazem do 741 um componente muito recomendável para a utilização em instrumentação.

Considerando que algumas configurações básicas para o emprego do op-amp já foram vistas na lição teórica, temos a certeza de que, a esta altura, o aluno é possuidor de todas as informações básicas necessárias para a compreensão da grande maioria dos circuitos que fazem uso de operacionais.

Resta-nos apenas comentarmos que, em áudio, os op-amps são muito empregados como pré-amplificadores, tanto para sinais de baixo nível, correção de tonalidade e até mesmo como excitadores de etapas de potência, tanto na forma discreta como integrada, sendo esta última alvo da nossa lição especial.

CURSO DE ELETRÔNICA BÁSICA RÁDIO - TV

11ª LIÇÃO ESPECIAL

CIRCUITO INTEGRADO

I - Microeletrônica

O aparecimento do transistor provocou enorme impacto na Eletrônica. Com ele foi possível a realização de circuitos complexos de tamanho reduzido, de baixo consumo, leves e, sobretudo confiáveis. Entretanto, se o aluno já teve a oportunidade de abrir um transistor de baixa potência, certamente verificou que sua parte ativa é extremamente reduzida, necessitando de lente de aumento para a observação mais detalhada de sua constituição. O volume maior do transistor é devido ao encapsulamento de proteção e aos terminais de ligação. A técnica, cada vez mais desenvolvida, de produção do transistor possibilita a realização de dispositivo tão pequeno que a utilização de fios para ligá-lo ao circuito é uma inútil perda de espaço. Considerando que componentes passivos, tais como resistor, capacitor, diodo, etc., também podem ser realizados com a mesma tecnologia com que se produz o transistor e, portanto, com dimensões também reduzidas, os pesquisadores realizaram circuitos contendo componentes ativos e passivos interligados sem fio, ou seja, utilizando a técnica de fabricação do componente para atingir o resultado final. À esta técnica de fabricação chamou-se de eletrônica molecular e, posteriormente, microeletrônica, sendo que esta última designação é mais coerente e, por isso, de maior aceitação. Os circuitos realizados segundo essa técnica receberam o nome de **circuitos integrados.**

II - Circuitos integrados

Pode-se afirmar que o **circuito integrado**, geralmente abreviado por CI e que o aluno não deve, de maneira alguma, confundir com circuito impresso, é um dispositivo formado pela associação de componentes convencionais interligados e integrados em um mesmo módulo, de modo a constituir um circuito eletrônico completo. A quantidade de componentes ativos e passivos do circuito integrado depende da finalidade principal para a qual ele é projetado. Para que o aluno tenha uma idéia do assunto, na **figura 1** mostramos um circuito integrado bem simples,em sua representação esquemática, disposição de terminais e o circuito eletrônico interno correspondente.
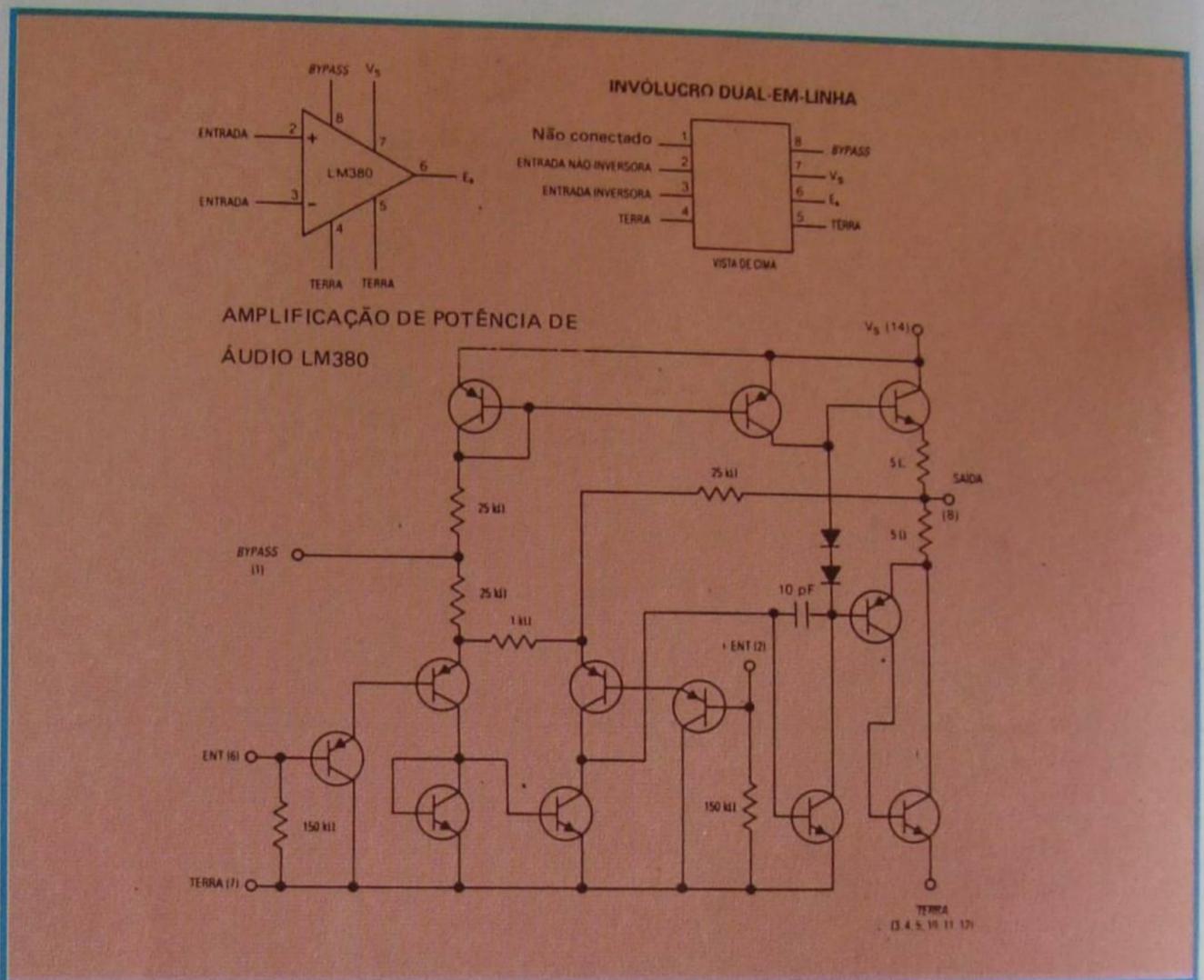
Figura 1 - Circuito integrado LM 380.

III - Classificação do circuito integrado

a) Quanto ao modo de obtenção

De acordo com o processo de fabricação do circuito integrado, podemos dividí-lo em **monolítico e pelicular**.

O circuito integrado monolítico é obtido partindo-se de um cristal semicondutor e criando-se nesse cristal, através de processos adequados, os diversos componentes do circuito.

O circuito integrado pelicular (em inglês "thin-film", cuja tradução literal é "película fina"), que muitos autores nacionais denominam de **circuito integrado de deposição**, tem seus componentes obtidos pela disposição, em camadas, de material adequado.

Devemos aduzir que essas duas técnicas da microeletrônica são empregadas também na obtenção de componentes discretos denominados **micromódulos**, tais como resistores, capacitores, indutores, etc., de reduzidas dimensões.

b) Quanto à aplicação

Sob o aspecto da aplicação do circuito, costuma-se classificá-lo em **circuito integrado digital** e **circuito integrado linear**.

O circuito integrado digital foi projetado para ser utilizado no campo da lógica digital. Devemos esclarecer que, em Matemática, chama-se de digital todo aparelho que mede grandezas através de um sistema de numeração adequado, que pode ser o decimal ou não. Assim, o

contador de rotações da fita em um gravador, por exemplo, onde a quantidade de voltas é indicada por uma série de números no visor do dispositivo, é chamado de digital. O tipo de relógio sem ponteiros, onde o tempo é marcado pelos números do visor, também é digital. Por analogia, em Eletrônica, também se chama de digital a técnica de processamento numérico. Essa técnica é largamente utilizada em computadores, calculadoras, relógios, instrumentação de medida, etc.

O circuito integrado linear é criado para desempenhar as mais variadas funções dentro da Eletrônica que não seja especificamente a função digital. Assim, foram desenvolvidos circuitos para amplificadores, demoduladores de crominância em TV colorida, controlador de velocidade de motores, amplificadores para surdez e qualquer outra aplicação que o aluno imaginar. Na classe do circuito integrado linear está o chamado **amplificador operacional**. Este tipo de amplificador, teoricamente, é um amplificador de tensão, de ganho muito grande, alta impedância de entrada e baixíssima impedância de saída. No domínio do nosso curso, ou seja, áudio, rádio e TV, são os circuitos integrados lineares os de maior aplicação.

IV - Tecnologia do circuito integrado

Como se afirmou anteriormente, para se formar o circuito integrado é necessário associar os componentes ativos e passivos; portanto, a técnica de obtenção dos elementos passivos deve ser compatível com a dos ativos. Vejamos os métodos mais usados para obtenção de resistores, capacitores, etc.:

a) Resistor

Os resistores costumam ser obtidos por **difusão** ou por **deposição**. O processo de deposição é utilizado quando se necessita de resistência de valor alto. Consiste na deposição de uma fina película de material metálico sobre a superfície do semicondutor. O processo da difusão consiste na dopagem do material semicondutor, difundindo-se nele as impurezas. Com isso, modifica-se a resistividade. Escolhendo-se a área e o comprimento da região dopada, tem-se a resistência desejada.

b) Capacitor

A obtenção de capacitâncias pode ser feita por **deposição** ou pela **polarização inversa de uma junção**. No primeiro processo, deposita-se inicialmente uma camada finíssima de metal; a seguir, outra de isolante, e, finalmente, a terceira, também metálica. As duas metálicas serão as armaduras do capacitor, e a isolante, o dielétrico. O processo da polarização inversa da junção fundamenta-se na propriedade das junções de apresentar capacitância que varia com a tensão inversa aplicada.

c) Indutor

A indutância pode ser obtida pela deposição de película fina, de forma conveniente. Esse processo, entretanto, é empregado na fabricação de micromódulo e muito raramente em circuito integrado, já que o valor de indutância que se consegue em área pequena é muito reduzido. Quando há necessidade de indutor no circuito, ele é ligado externamente ao circuito integrado.

d) Circuito completo

Existem vários processos de fabricação de circuitos integrados, todos eles dependentes de técnicas altamente complexas e especializadas que visam aumentar a confiabilidade, diminuir o custo, aumentar a possibilidade de aplicação do mesmo circuito, etc.

O circuito integrado monolítico, fabricado segundo a tecnologia clássica, é feito do seguinte modo: Parte-se de uma placa de silício denominada **substrato** e, sobre ela, deposita-se uma fina camada de óxido de silício. Em seguida, reveste-se essa camada com material fotossensível. Na etapa seguinte, o desenho do circuito, previamente preparado e passado para um filme fotográfico (negativo), é projetado sobre a pastilha, após o que, por revelação, ficará gravado sobre a placa o desenho do circuito. Em seguida, a pastilha é submetida a uma substância que retira a camada de material fotossensível que não foi exposta à luz abrindo as **janelas** desejadas. Nessas janelas, serão difundidas as impurezas, formando-se os componentes desejados do circuito. Para a ligação dos componentes, faz-se a deposição de uma camada de alumínio por vaporização. A seguir, o alumínio é retirado das superfícies que não devem fazer contato. Como o aluno pode perceber por essa explicação sucinta, o processo é bastante semelhante ao da fabricação de "circuito impresso", em princípio.

Evidentemente, o circuito integrado não é produzido individualmente; em uma mesma pastilha de semicondutor, podem-se produzir centenas ou milhares de circuitos integrados "idênticos", dependendo da complexidade e, conseqüentemente, das dimensões do circuito.

Após a produção dos circuitos, eles são separados por corte e encapsulados.

Na **figura 2**, mostramos o desenho de um circuito integrado grandemente ampliado.
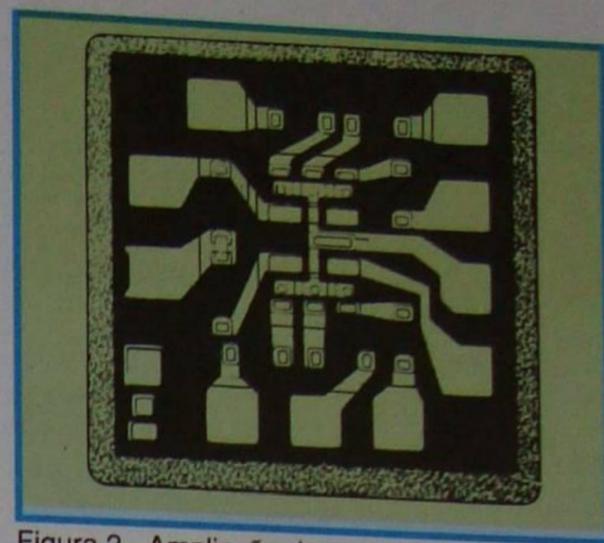
Figura 2 - Ampliação de um circuito integrado.

V - Encapsulamento

A função do encapsulamento do circuito integrado é a mesma que apresentamos para o transistor, em outra parte do curso, isto é, proteger a pastilha contra choques mecânicos, contra a ação do meio ambiente (umidade, poeira, etc.), dissipar o calor gerado no interior da pastilha e fixar os terminais de ligação externa.

Existe uma variedade muito grande de tipo de invólucro de circuito integrado, conforme pode-se observar por intermédio da **figura 3.** Por isso, vamos apresentar somente algumas delas, as mais comuns, do tipo em linha, para que o aluno tenha uma noção do assunto.
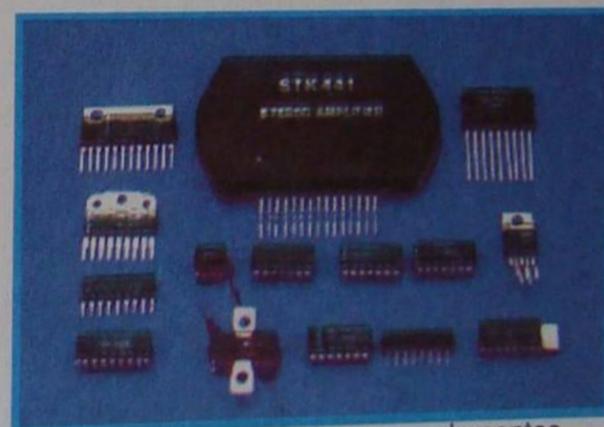
Figura 3 - Alguns tipos de encapsulamentos.

A classificação de encapsulamento em linha, na realidade, não se refere ao invólucro, mas à disposição dos terminais de ligação. O invólucro do CI pode ser de plástico, epoxi ou cerâmica, tendo as formas mais variadas.

Segundo a posição dos terminais, o CI é denominado de:

1) **em linha simples** ("Single In-Line Pin", em inglês, que significa "pinos em linhas simples") ou **SIP**, caso os terminais do componente encontrem-se dispostos em apenas um dos lados do mesmo. Essa disposição pode ser vista na **figura 4**.
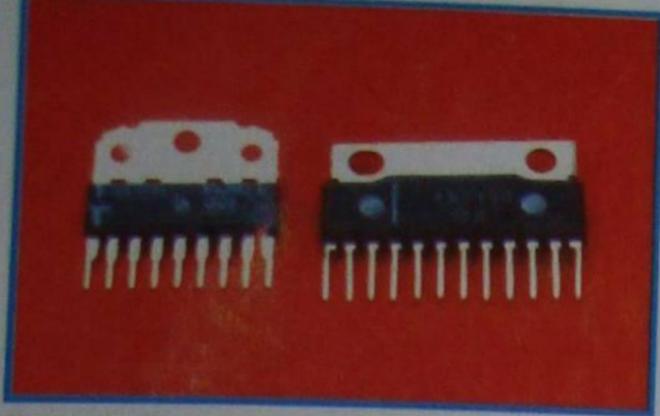
Figura 4 - Encapsulamento SIP.

2) **duplo em linha** ("Dual In-Line", em inglês) ou **DIL**, se os terminais estão alinhados de modo a formar duas filas, conforme mostrado na **figura 5**.
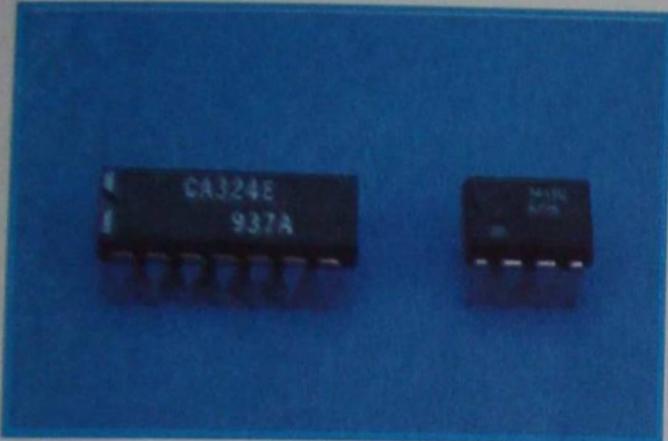
Figura 5 - Encapsulamento DIL.

3) **quádruplo em linha** ("quadruple-in-line", ou "Quad-In-Line", em inglês), se os terminais são alinhados de modo a formar quatro filas, conforme mostrado na **figura 6**.
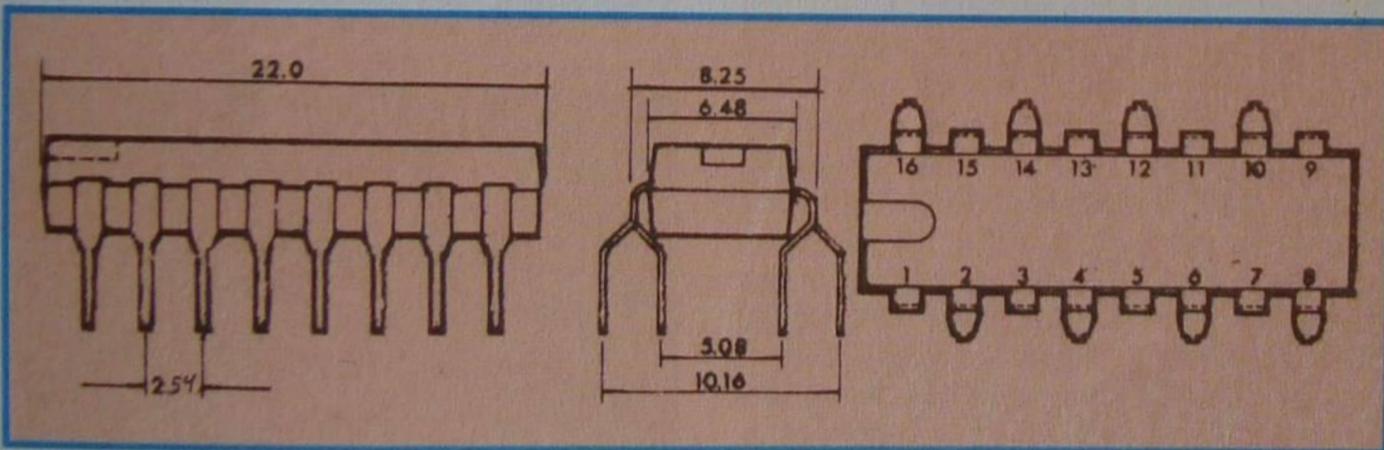
Figura 6 - Encapsulamento Quad-In-Line.
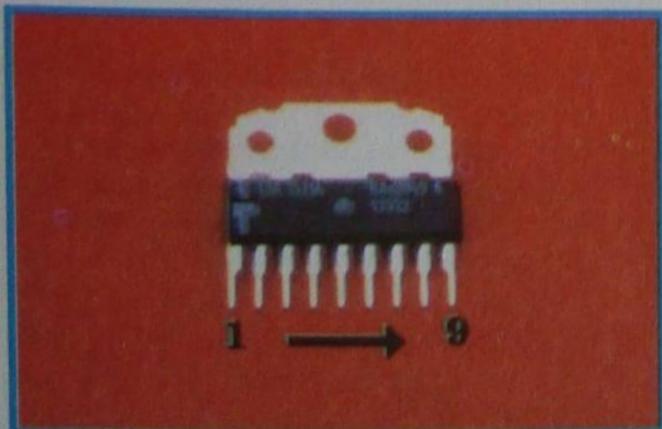
Figura 7 - Sentido de contagem dos terminais de um CI.

Quanto à identificação dos terminais dos circuitos integrados, esta sempre deverá ser feita **em sentido anti-horário**, a partir de uma pinta ou um chanfro (às vezes, as duas coisas) em um dos cantos do invólucro, conforme indicado na figura 6 (para encapsulamentos DIL ou Quad-In-Line); ou **da esquerda para a direita**, conforme indicado na **figura 7** (para encapsulamento SIP e similares).

V - Fixação de CI

Os circuitos integrados normalmente são fixados às placas de circuito impresso, através de soldagem direta ou pelo emprego de soquetes adequados, similares aos mostrados na **figura 8**. Para esta última prática, foram criados soquetes que vão soldados à placa de circuito impresso. O número de terminais e a forma física do soquete depende, evidentemente, do tipo de CI a ser empregado. A colocação do CI no soquete, quando é grande seu número de terminais, é tarefa delicada, que requer
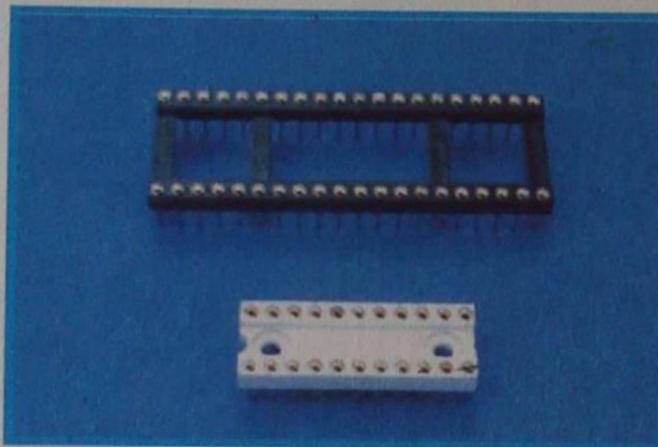
Figura 8 - Soquetes para CIs.

Figura 9 - Materiais para manuseio de CIs.

um pouco de prática do técnico, uma vez que os terminais devem penetrar no soquete simultaneamente. Analogamente, a retirada do CI do soquete também requer prática. Atualmente, existem materiais (alguns mostrados na **figura 9**) especialmente projetados para o trabalho com CIs.

A fixação do CI por solda inicialmente requer a introdução do componente no circuito impresso, implicando cuidados semelhantes ao da introdução em soquete e, posteriormente, a soldagem do componente nos filetes do circuito impresso. Neste ponto, o aluno deve observar que o circuito integrado aloja componentes de dimensões microscópicas, incapazes de absorver calor; conseqüentemente, a soldadura deve ser realizada com ferro de soldar de pequena potência (30 W no máximo), de ponta fina. Além disso, a soldagem deve ser efetuada com perfeição e no menor tempo possível.

Um problema maior que a soldagem é a retirada de um CI de uma placa de fiação impressa, quando se trata de CI de muitos terminais. De fato, quando se dessolda um terminal e passa-se ao seguinte, o primeiro se esfria e torna a fixar-se, e assim por diante. Por isso para a dessoldagem de CI (e também qualquer outro componente) de um circuito impresso, é imperioso o uso de uma ferramenta especial conhecida como **sugador de solda** ou aspirador de solda, que é mostrado na **figura 10**. Como o próprio nome indica, essa ferramenta aspira a solda, enquanto está líquida, deixando o furo do circuito impresso e o terminal do circuito integrado limpos e prontos para que o componente possa ser extraído, o que deve ser feito com o auxílio de uma **pinça**, similar à mostrada na **figura 11**

Figura 10 - Sugador de solda.

Figura 11 - Pinça.